

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  
доцент **Данильев С.М.**

Санкт-Петербург – 2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ.....	12
1.1 Происхождение и условия накопления газа в грунтах верхней части разреза .....	12
1.2 Описание известных скоплений газа в четвертичных осадках.....	15
1.3 Газопроявления на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области .....	20
1.4 Влияние газонасыщенности на свойства грунтов ВЧР, как оснований для строительства зданий и сооружений.....	25
1.5 Выводы по главе 1.....	29
ГЛАВА 2 ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ЛОКАЛЬНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ ГАЗА.....	30
2.1 Инженерно-геологические и петрофизические свойства песчано- глинистых грунтов .....	31
2.1.1 Инженерно-геологические и гидрогеологические свойства песчано- глинистых грунтов .....	31
2.1.2 Геоэлектрические свойства песчано-глинистых грунтов.....	38
2.1.3 Сейсмические свойства песчано-глинистых грунтов .....	44
2.2 Инженерно-геологические строение участка с зафиксированными газопроявлениями .....	53
2.3 УЭС и скорости ФГМ песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа.....	54

2.4	Комплексная электро- и сейсмогеологическая модель песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа.....	58
2.4.1	Результаты моделирования электротомографических разрезов.....	63
2.4.2	Результаты моделирования скоростных сейсмотомографических разрезов .....	66
2.5	Выводы к главе 2.....	70
<b>ГЛАВА 3 КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМО- И ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИНЗ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ.....</b>		
3.1	Предпосылки комплексирования методов электроразведки и сейсморазведки.....	72
3.2	Совместный анализ данных электроразведки и сейсморазведки .....	74
3.3	Обоснование комплекса методов геофизических исследований.....	78
3.3.1	Электроразведка методом ВЭЗ в модификации геоэлектрической томографии (ГЭТ) .....	79
3.3.2	Сейсморазведочные исследования.....	83
3.4	Обработка данных сейсморазведки с применением амплитудной томографии .....	88
3.5	Результаты исследований методами электроразведки и сейсморазведки	89
3.6	Выводы к главе 3.....	92
<b>ГЛАВА 4 ВЫЯВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ .....</b>		
4.1	Краткая характеристика изучаемого участка исследования с наличием приповерхностных скоплений газа .....	96
4.1.1	Физико-географические условия.....	96

4.1.2 Геоморфология и рельеф.....	97
4.1.3 Геологическое строение .....	98
4.1.4 Инженерно-геологические условия .....	102
4.2 Результаты инженерно-геофизических исследований.....	103
4.2.1 Результаты электроразведочных работ.....	105
4.2.2 Результаты выполнения полевых сейсморазведочных работ .....	109
4.3 Выводы по главе 4.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	115
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

Для Санкт-Петербурга и Ленинградской области одним из опасных факторов в процессе производства инженерных изысканий и эксплуатации зданий и сооружений является биохимическое газообразование в грунтах [33], причиной 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. Скопления газа в верхней части геологического разреза создают потенциальную

опасность производства инженерных изысканий для строительства, а также для эксплуатации зданий и сооружений.

Приповерхностные скопления газа вызывают большой интерес отечественных и зарубежных ученых (С.Г. Миронюк, С.И. Рокос, Arntsen B, Anderson A. L., Hampton L. D, T. L. Armstrong, Zhou J.), в первую очередь как фактор поисков и разведки крупных газовых месторождений (Sheriff 2002). На этапе разработки месторождений обнаружение скоплений газа имеет важное значение для предупреждения внезапных выбросов газа в процессе бурения. Вопрос изучения приповерхностных газопроявлений в районах развития многолетнемерзлых пород освещен в работах В.С. Якушева и В.И. Богоявленского. Исследования газонасыщенных осадков на акваториях сейсмоакустическими методами изложено в работах А.Е. Рыбалко, М.Ю. Токарева, Д.А. Субетто, М.И. Алешина, П. Ю. Беляева, В.А. Жамойда. Значительный вклад в изучение газонасыщенных грунтов на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области внесли Р. Э. Дашко, И.И. Краснов, Е.С. Руденко. Исследования утечек свалочного газа методами электротомографии проводились за рубежом (Dahlin T., Rosqvist H., Leroux V. Svensson, M. Lindsjö, M. Månsson, С-Н. Johansson).

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

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

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

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

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

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

#### **Научная новизна**

1. Обоснование методики комплексной интерпретации данных методов малоуглубинной геофизики при инженерно-геофизических исследованиях песчано-глинистых грунтов ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа;
2. Разработка комплексной физико-геологической модели, основанной на совместной интерпретации данных малоуглубинной геофизики для выявления и локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР;
3. Повышение информативности и достоверности результатов геофизических исследований, путем разработки принципов комплексной интерпретации, для выявления и локализации зон скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

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

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

3. Применение методических приемов в процессе обработки данных геофизических исследований позволит повысить достоверность и информативность результатов в процессе выделения локальных неоднородностей, связанных со скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР.

## **Методология и методы исследования**

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

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

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

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

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

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

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

3. Разработанный и опробованный на практике комплексный подход, базирующийся на данных электротомографии и сейсмотомографии и обоснованных методических приемах совместной интерпретации, обеспечивает детальное изучение неоднородностей песчано-глинистых грунтов, связанных с развитием опасных газодинамических процессов.

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

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

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

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

15th Conference and Exhibition), 16-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020».

### **Публикации**

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

### **Личный вклад автора**

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

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

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов к ним, заключения и библиографического списка. Содержит 130 страниц машинописного текста, 40 рисунков, 10 таблиц, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 117 наименований.

### **Благодарности**

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

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

Особую благодарность автор выражает: Куликову Андрею Игоревичу, Ефимовой Наталье Николаевне и Татарскому Антону Юрьевичу за помощь в процессе работы над диссертацией и предоставленные материалы полевых исследований.

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

Приповерхностные локальные скопления газа, формирующиеся в верхней части геологического разреза, за счет биохимических преобразований органического вещества представляют серьезную опасность для объектов гражданского и промышленного строительства, как на этапе инженерно-геологических изысканий, так и в процессе их эксплуатации.

В настоящей главе рассмотрен генезис скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР, их влияние на свойства грунта и инженерно-геологические условия строительства, на примере известных газопроявлений в верхней части разреза (ВЧР).

### **1.1 Происхождение и условия накопления газа в грунтах верхней части разреза**

Приповерхностные скопления газа образуются на глубинах до 150 м. Биогенный газ в современных отложениях – морских и континентальных – образуется 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 газа в зависимости от глубины отображена на рисунке 1.1 [89].

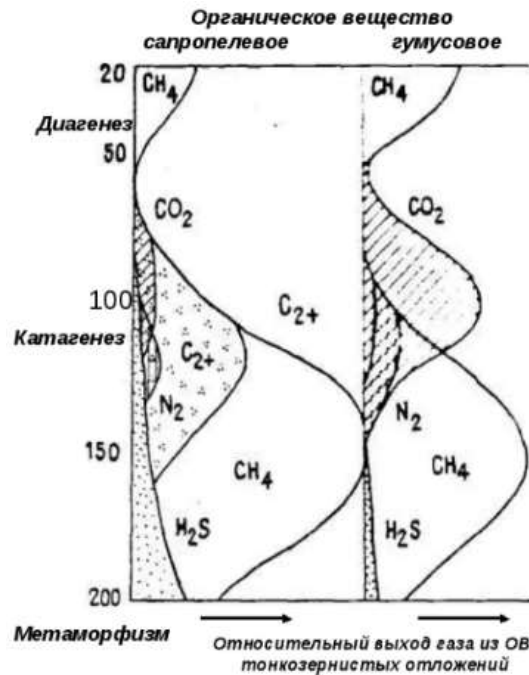


Рисунок 1.1 – Кривая образования газа в зависимости от глубины [89]

Локальные скопления газа в ВЧР также могут быть представлены газами глубинного происхождения. В этом случае они как правило 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.

Исследования грунтовых газов могут использоваться для определения подземных залежей углеводородов, а также путей миграции газа (разломов). Экспериментальные данные показывают, что в большинстве мест имеется достаточная вертикальная проницаемость (разломы, трещины и т. д.), чтобы повышенные концентрации газа в почве существовали непосредственно над залежами углеводородов.

Метан, 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].

Образование газов в песчано-глинистых грунтах ВЧР происходит в процессе природной биохимической газогенерации, в процессе разложения 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 (Рисунок 1.2), за счет чего создается избыточное давление и опасность внезапных выбросов газа.

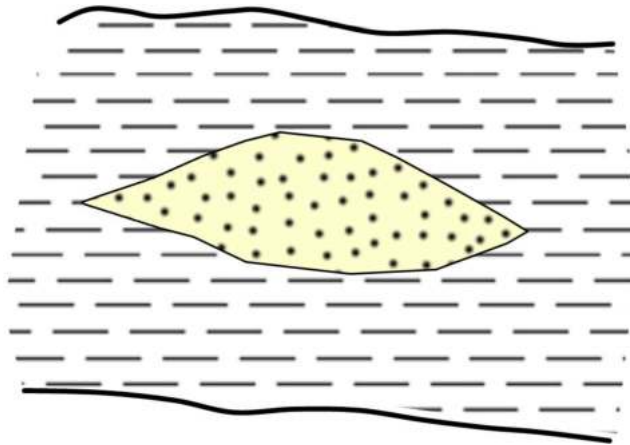


Рисунок 1.2 – Проницаемая линза, со всех сторон окруженная плохо проницаемыми породами

Геологические условия среды, способствующие накоплению органического вещества: 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].

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 известных скоплений газа в четвертичных осадках**

Приповерхностные скопления газа широко распространены во всем мире: в зонах развития многолетнемерзлых пород, 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 зафиксированы в приполярных районах Западной Сибири, на полуострове Ямал [10,11], на суше, дне рек и озёр и описаны в работах [44,74,75] где отмечается, что для предотвращения внезапных выбросов и предотвращения опасности в процессе освоения территории необходимы детальные исследования природы этих газопроявлений в том числе и геофизическими методами.

Считается, что накопление газа в приповерхностных слоях происходит благодаря миграции по системе вертикальных разломов из более глубоких месторождений, хотя в таких скоплениях зачастую присутствует и газ, имеющий биогенную природу.

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 было высказано 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 на шельфе Печерского моря из четвертичных отложений. Они наблюдались из песчаных линз межледниковых отложений. Предполагается, что рассматриваемые структуры возникли в результате деформаций осадочной толщи под давлением газа. На основании данных бурения можно предположить, что скопления газа с аномально высоким пластовым давлением содержатся в разрозненных песчаных линзах. Эти линзы развиты на участках относительно ровного дна, разделяющих диапироподобные поднятия. Вероятно, при снижении горного давления в результате колебаний уровня моря, сейсмических сотрясений, волнения и т.п. газ, защемленный 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 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 Д.

Позднечетвертичные неглубокие биогенные газовые резервуары были обнаружены и эксплуатируются в промышленных целях в прибрежной зоне залива Ханчжоу, северная провинция Чжэцзян, восточный Китай. Река в этом районе сильно врезалась в подстилающие палеорусла в период оледенения, в результате которого образовались долины Цяньтанцзян и Тайху [103,116,117]. Эти врезанные долины были 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).

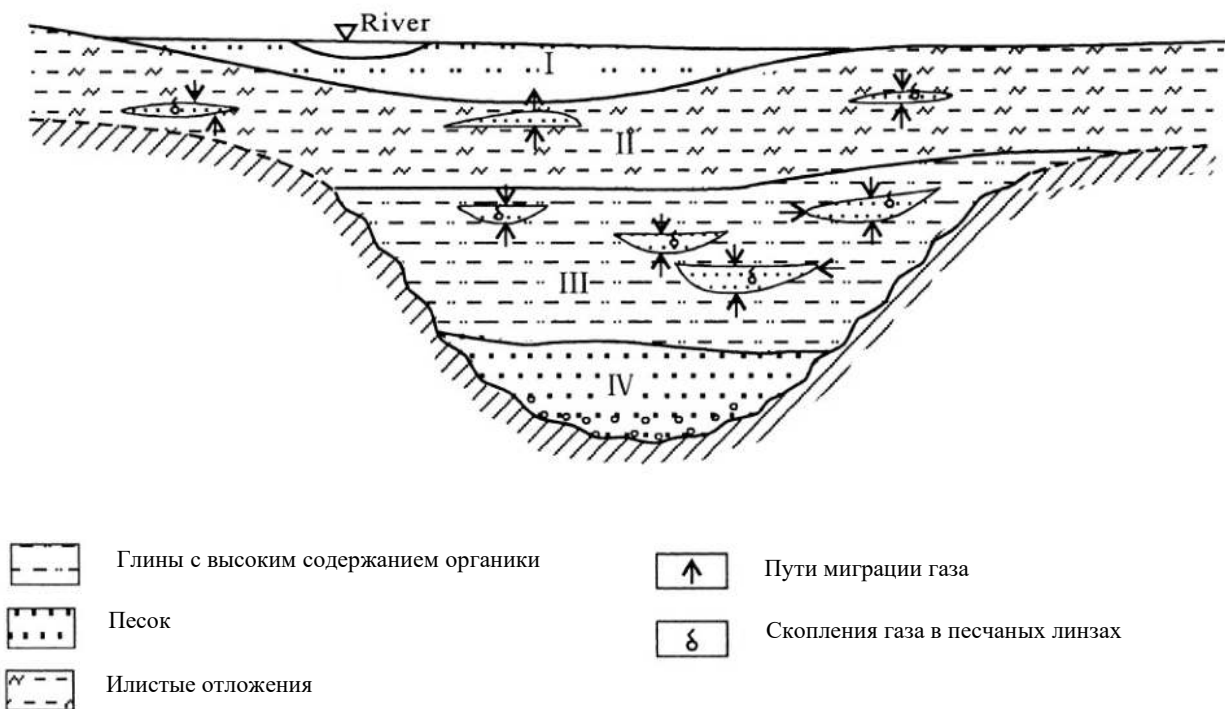


Рисунок 1.3 – Схематический разрез погребенной палеодолины с включение локальных скоплений газа в песчаных линзах [104].

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%.

Многочисленные газопроявления были 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 были обнаружены природные газы, приуроченные к четвертичным отложениям. В скважине общей глубиной 72.29 м, первый газоносный горизонт мощностью 1.21 м был 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), построенным по результатам 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 пелециопод и растительные остатки, прослеживаются на глубине около 61 – 75 м ниже уровня моря [24].

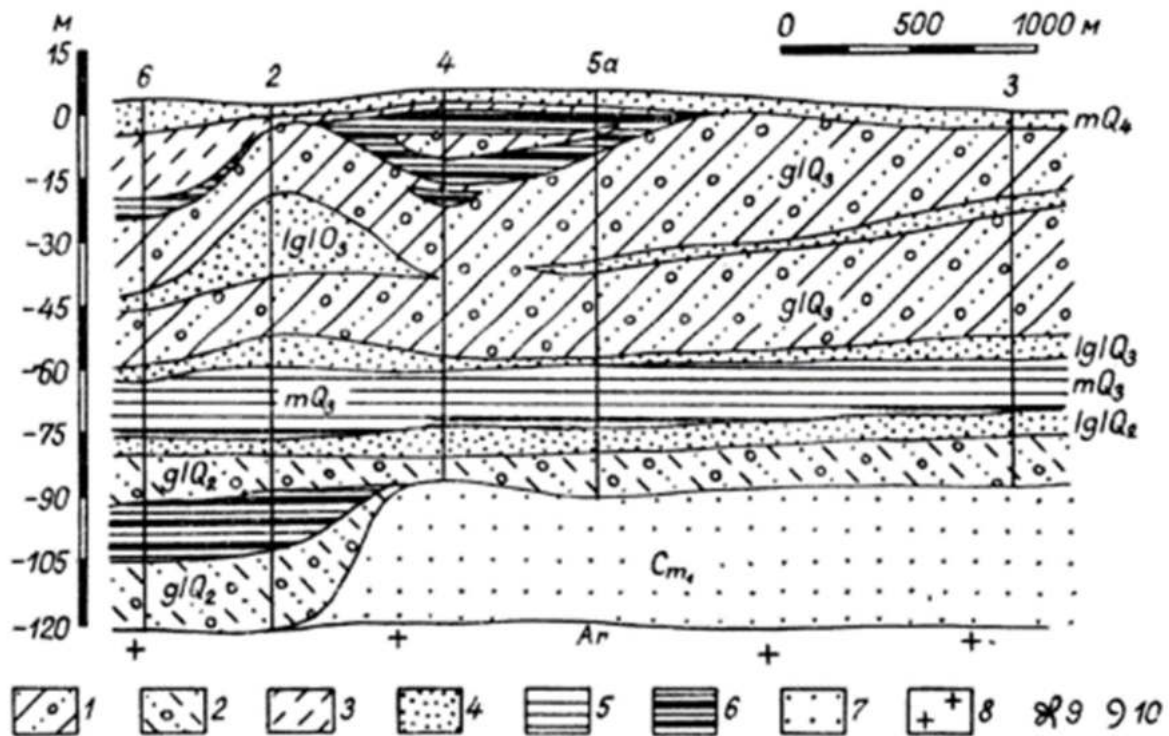


Рисунок 1.4 – Разрез четвертичных отложений острова Суур-Прангли:

(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 на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Газопроявления в верхней части разреза являются одним из факторов геологического риска для 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].

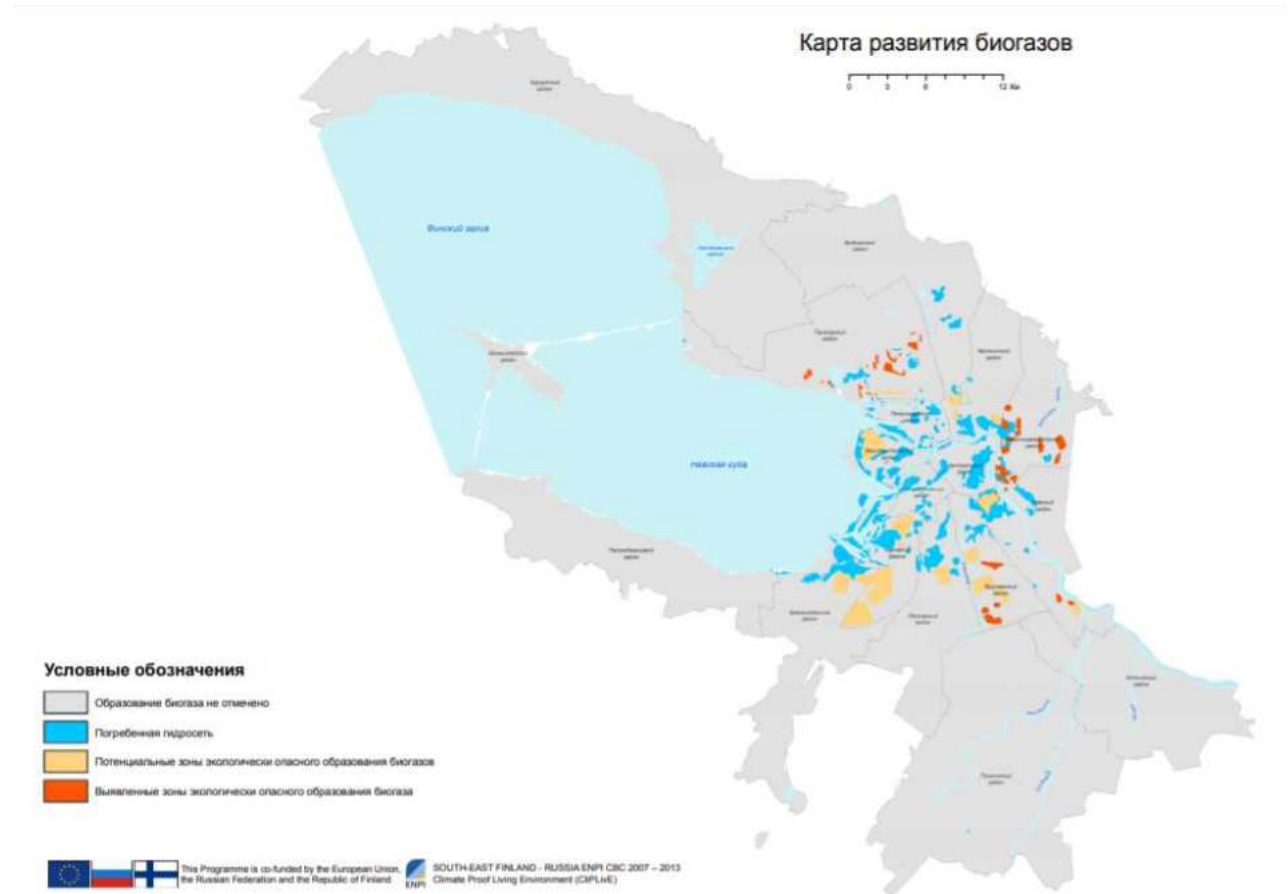


Рисунок 1.5 – Карта развития биогазов на территории г. Санкт-Петербурга [21]

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 чаще всего эпизоды, имеющие аварийный характер. Потенциально опасными участками по выделению биогаза в Санкт-Петербурге являются Красногвардейский, Невский, Приморский, Фрунзенский районы (Рисунок 1.5).

Все газопроявления были зафиксированы из различных интервалов разреза и имели различный генезис. В верхней части четвертичной толщи (глубина от 6 до 15 м) из обогащенных органическим веществом болотных, литориновых, реже озерно-ледниковых отложений; повсеместно отмечался метан и азот, высокие концентрации которых можно объяснить наличием богатого биоценоза, так как торфа и заторфованные песчано-глинистые отложения, которые 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 из микулинского горизонта представлены главным образом метаном и азотом, содержание которого на отдельных участках приближалось к содержанию метана. Углекислый газ присутствовал в количестве – от 0.3 до 4.0%.

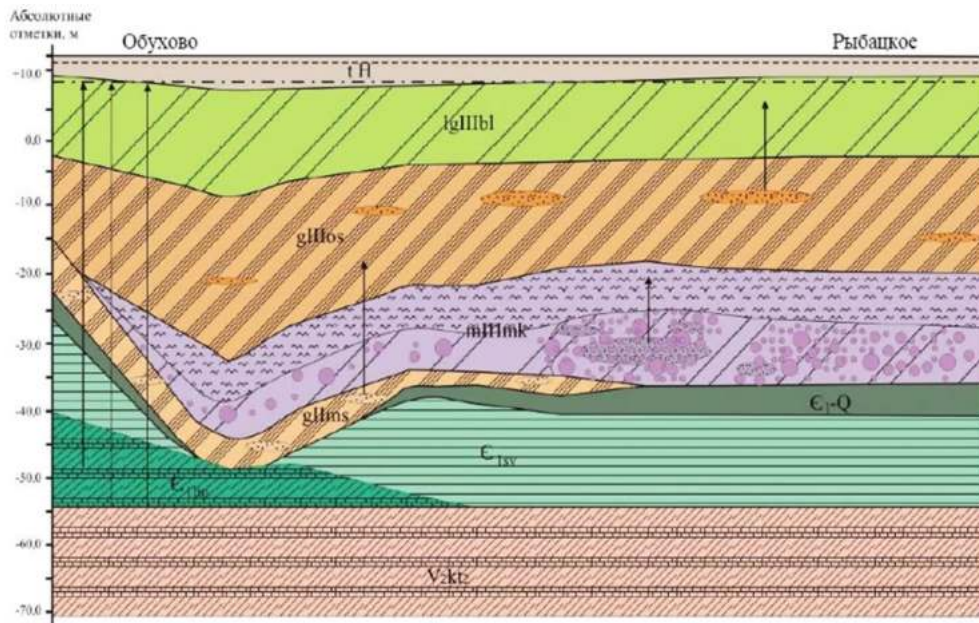
Также наблюдаются газопроявления в толще коренных пород нижнекембрийского и вендского возрастов. Газ, выделяющийся из толщи коренных пород, представлен почти чистым азотом.

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 порядка 130 – 110 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 встречаются реже [16]. По данным [91], включающих большое

количество валунов и глыб, принесенных из Скандинавии в период наступления ледника.



#### Условные обозначения

tH	техногенные пески и супеси
lgIIIbl	озерно-ледниковые ленточные суглинки и глины с линзами песка и супесей
gIIlos	суглинки осташковской морены с включениями гравия и гальки с линзами супесей и прослоями и линзами водонасыщенного песка
mIIImk	микулинские тонкослоистые суглинки и глины, мелкозернистые пески с прослоями органики
gIIms	суглинки московской морены с включениями гравия, гальки и валунов с линзами супесей и прослоями и линзами водонасыщенного песка
C <sub>1</sub> -Q	переходный слой, представленный перемятыми глинами нижнего кембрия с редкими включениями гравия, гальки и валунов
C <sub>1sv</sub>	нижнекембрийские глины сиверской свиты с прослойками кварцевых песчаников
C <sub>1lm</sub>	толща переслаивания: нижнекембрийские ломоносовские песчаники и глины
Vkt	венские верхнекотлинские глины с прослоями песчаников
	участки газопровлений
	напор

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

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.

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, как оснований для строительства зданий и сооружений**

Наличие в грунтах газов в заземленном состоянии оказывает значительное влияние на свойства грунтов. В тонкодисперсных грунтах заземленные 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 заземленными газами, склонны проявлять многолетнюю осадку в основании сооружений [83].

Негативное влияние газонасыщенных грунтов на инженерно-геологические условия и на устойчивость сооружений может проявляться снижением 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 плывунов. 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 плывунное 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, и 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 заземленных газов в грунтах может обуславливать и 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 порядка 9 м. Измерения методом акустического каротажа показали понижение скорости продольных волн (ниже 500 м/с), что также могло быть вызвано присутствием газа. Возможным объяснением понижения скорости является присутствие метана. При сравнении скважинных данных с томографической скоростной моделью понижение скорости отмечалось на различных глубинах, но по значению скорости очень похоже, что указывает на наличие газовых карманов в этой области. Возможно, что мощный крупнозернистый слой выступал в качестве небольшого резервуара для накопления газа и глинистые материалы выше действовали локально, как герметизирующий

слой или крышка. Газ выделялся в процессе бурения, как только были пройдены покрывающие отложения. 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 также является потенциально опасной относительно появления биогазов. При отсутствии препятствий образующийся газ свободно выходит в атмосферу. Однако на намывной территории среди песков нередко появляются 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 оснований бетонных плотин крупных гидроэлектростанций, обусловленные микроорганизмами. 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].

## 1.5 Выводы по главе 1

1. 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.
2. Факторами для формирования газа является наличие органического вещества в толще осадочных пород и микроорганизмов, которые его перерабатывают.
3. 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.
4. Скопления газа являются источником высокого геологического риска для объектов строительства, так как вызывают разуплотнение и снижение несущей способности песчано-глинистых грунтов.
5. Для предотвращения опасности, связанной со скоплениями газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР необходимо выявление таких скоплений, в том числе и геофизическими методами на стадии инженерных изысканий участка строительства. В нормативной документации в достаточной мере не регламентировано выявление локальных скоплений газа и методика их исследования, поэтому данная тематика является актуальной для практики инженерных изысканий для строительства.

## ГЛАВА 2 ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ЛОКАЛЬНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ ГАЗА

Для обоснования применения комплекса геофизических методов необходима априорная физико-геологическая модель исследуемого объекта, которая включает физические свойства грунтов исследуемого разреза и синтезированные геофизические поля.

В настоящей главе рассматриваются результаты численного моделирования геофизических полей для различных типов песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа.

Основой для моделирования послужила имеющаяся геолого-геофизическая информация, полученная на участке с наличием локальных скоплений газа, где ранее наблюдались газопроявления из скважин и справочная информация о физических свойствах песчано-глинистых грунтов. Последовательно рассмотрено проявление геоэлектрических и сейсмических эффектов для различных типов песчано-глинистого разреза с включением неоднородностей, представляющих собой скопления газа в песчаных линзах и валунно-галечного материала.

Учет влияния неоднородностей на свойства массива грунтов является важной задачей в процессе строительства. Для оценки неоднородностей сравнительно небольшого размера по отношению к вмещающим породам недостаточно данных бурения. Необходимо с помощью геофизических исследований обеспечить как можно более плотную сеть наблюдений в точках среды, с целью выделения локальных неоднородностей, оказывающих значительное влияние на условия строительства и эксплуатацию зданий и сооружений.

## **2.1 Инженерно-геологические и петрофизические свойства песчано-глинистых грунтов**

Основными методами в инженерной геофизике являются электроразведка методом сопротивлений и сейсморазведка, в связи с этим в разделе рассмотрены геоэлектрические и сейсмические свойства применительно к песчано-глинистым отложениям и их связь с инженерно-геологическими параметрами.

### **2.1.1 Инженерно-геологические и гидрогеологические свойства песчано-глинистых грунтов**

Породы верхней части инженерно-геологического разреза, представленные несцементированными рыхлыми 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. Объемная плотность горных пород и зависит от: минерального состава (минеральные плотности и объемные доли), и пористости (поры, трещины) и плотность поровых флюидов [115]. Вода и воздух заполняют промежутки между минеральными частицами – поры, в которых может находиться или только воздух, или только вода, или воздух и вода вместе. Форма и размеры минеральных частиц рыхлых и слабосвязанных пород являются следствием их генезиса и определяют основные свойства и отличительные особенности этих пород. Так, например, ввиду относительно крупного размера частиц и их округлой формы удельная поверхность песка невелика, в воде он обычно инертен. По той же причине структура песка раздельнозернистая, и взаимное расположение зерен мало меняется под действием статической нагрузки. В то же время под воздействием динамических сил песок может сильно уплотняться, причем деформация протекает очень быстро и необратима. Консистенция мелкозернистых разностей может меняться от сыпучей в сухом состоянии до текучей при полном насыщении водой. По мере увеличения содержания тонкодисперсной фракции в породе (и в первую очередь увеличения ее глинистости) изменяются и свойства породы. Эти отличия особенно проявляются в отношении их к воде. Глинистые породы в отличие от

песчаных обладают большой физико-химической активностью при взаимодействии с водой вследствие повышенного содержания тонкодисперсных частиц в их составе. 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 определяющими их физические свойства являются глинистые минералы.

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 эффективное порового пространства [115] (Рисунок 2.1).

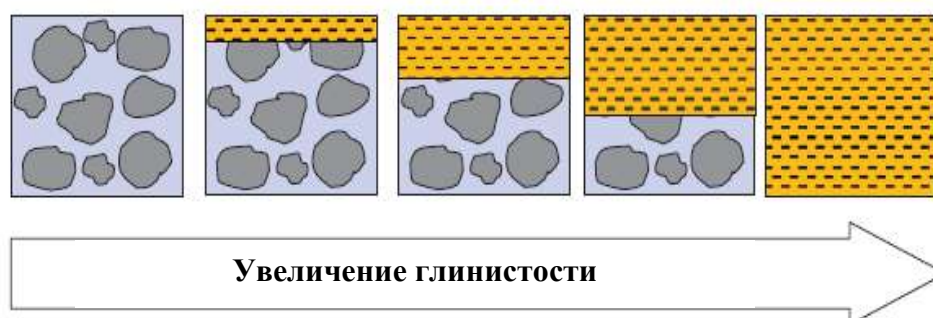


Рисунок 2.1. – Схема, характеризующая уменьшение проницаемости в песчано-глинистых грунтах в связи с увеличением глинистости

Глинистые частички 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.

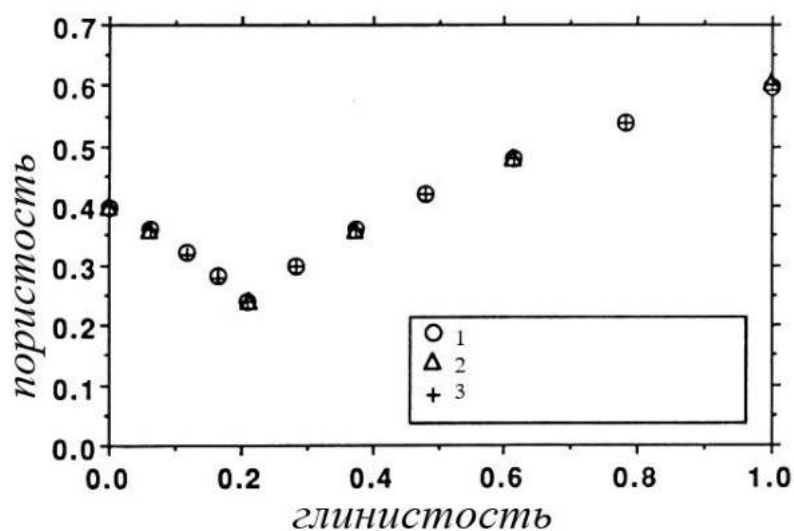


Рисунок 2.2 – Наблюдаемые и рассчитанные зависимости между пористостью и глинистостью для песчано-глинистых пород:

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

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 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 защемленного 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.

Таким образом, среди основных факторов определяющих физические свойства грунтов можно выделить следующие: пористость грунта, влажность грунта, структура грунта, минерализация поровой жидкости, температура, минералогический состав грунта [9].

Особенностью приповерхностных грунтов является наличие в них зоны аэрации. Зона аэрации это водоненасыщенная область геологической среды от поверхности до глубин до 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 2.3, а) [37].

Атмосферные осадки, которые просачиваются в зону аэрации, аккумулируются преимущественно в почвенном слое (верхние 10 – 20 см). Проникновение атмосферной влаги в глубокие зоны аэрации наступает лишь после продолжительного периода инфильтрации. Как видно из рисунка 2.3, происходит выравнивание влажности по всей глубине подзоны переменного увлажнения.

Воды капиллярной каймы образуются в условиях связи с грунтовыми водами зоны насыщения за счет капиллярного поднятия подземных вод [47]. Основными особенностями вод капиллярной каймы является тесная гидравлическая связь с грунтовыми водами, непостоянство режима – колебания уровня, температуры и количества вод. Высота капиллярного поднятия зависит от типа горных пород (Таблица 2.3).

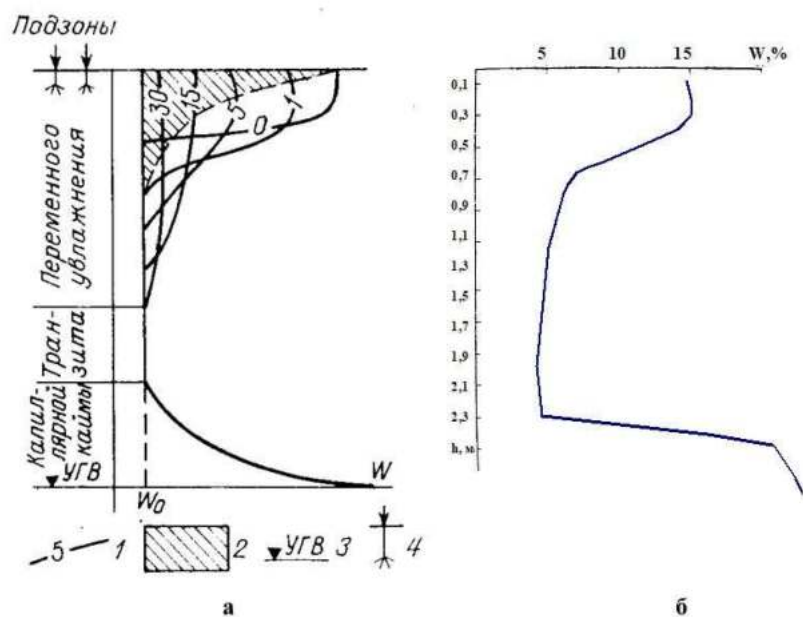


Рисунок 2.3 – Гидродинамический режим зоны аэрации. а)

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.

б) Эпюра влажности в зоне аэрации (по Н.Д.Добровольской)

Таблица 2.3 Высота капиллярного поднятия песчано-глинистых грунтов

Горные породы	Высота капиллярного поднятия ( $H_k$ ), м
Гравий мелкий	0.02-0.03
Песок крупнозернистый	0.06-0.12
Песок среднезернистый	0.12-0.35
Песок мелкозернистый	0.35-1.2
Супесь	1.2-3.5
Суглинок	3.5-6.5
Глина легкая	6.5-12.0

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 горных пород 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.

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

Большинство породообразующих минералов являются диэлектриками и имеют удельное электрическое сопротивление (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, обладающей 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 электропроводна благодаря содержащейся в ее порах воде. Таким образом пористость является основным фактором, контролирующим 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 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 вследствие уменьшения объема пор, по которым может распространяться электрический ток УЭС будет увеличиваться пропорционально пористости [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 2.4).

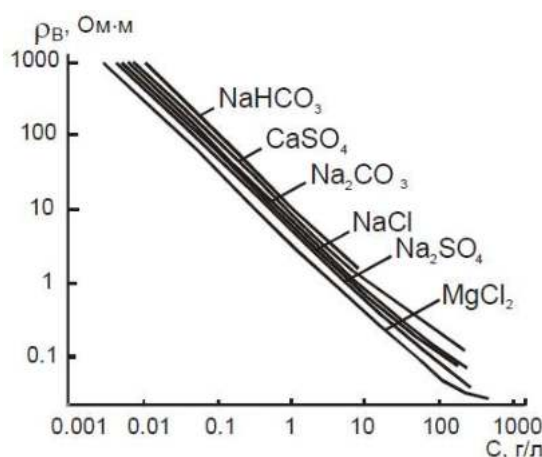


Рисунок 2.4 – Зависимость удельного электрического сопротивления воды от концентрации и химического состава растворенных солей [30]

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  $10^2$  Ом·м. Воды поверхностных водотоков обладают сопротивлением 10- $10^2$  Ом·м, а дождевые -  $10^2$ - $10^3$  Ом·м.

На сопротивление воды, находящейся в порах горной породы, оказывает влияние температура. При увеличении температуры значения УЭС воды увеличиваются. При понижении температуры до отрицательных значений происходит замерзание поровой влаги. При замерзании воды в порах и трещинах удельное сопротивление пород скачкообразно возрастает на 2-3 порядка, поэтому удельное электрическое сопротивление мерзлых пород значительно больше сопротивления пород в талом состоянии.

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.

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).

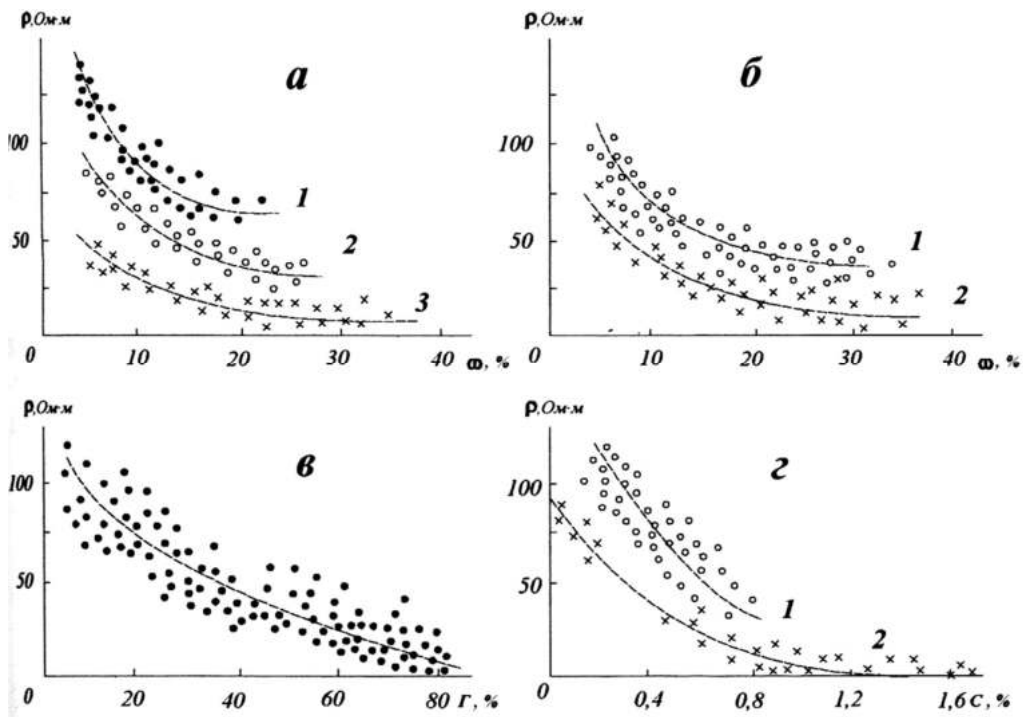


Рисунок 2.5 – Зависимость удельного электрического сопротивления от геолого-гидрогеологических параметров песчано-глинистых пород [9]:

а-от влажности  $W$ , полученная по результатам измерений в шурфах (11 - 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,

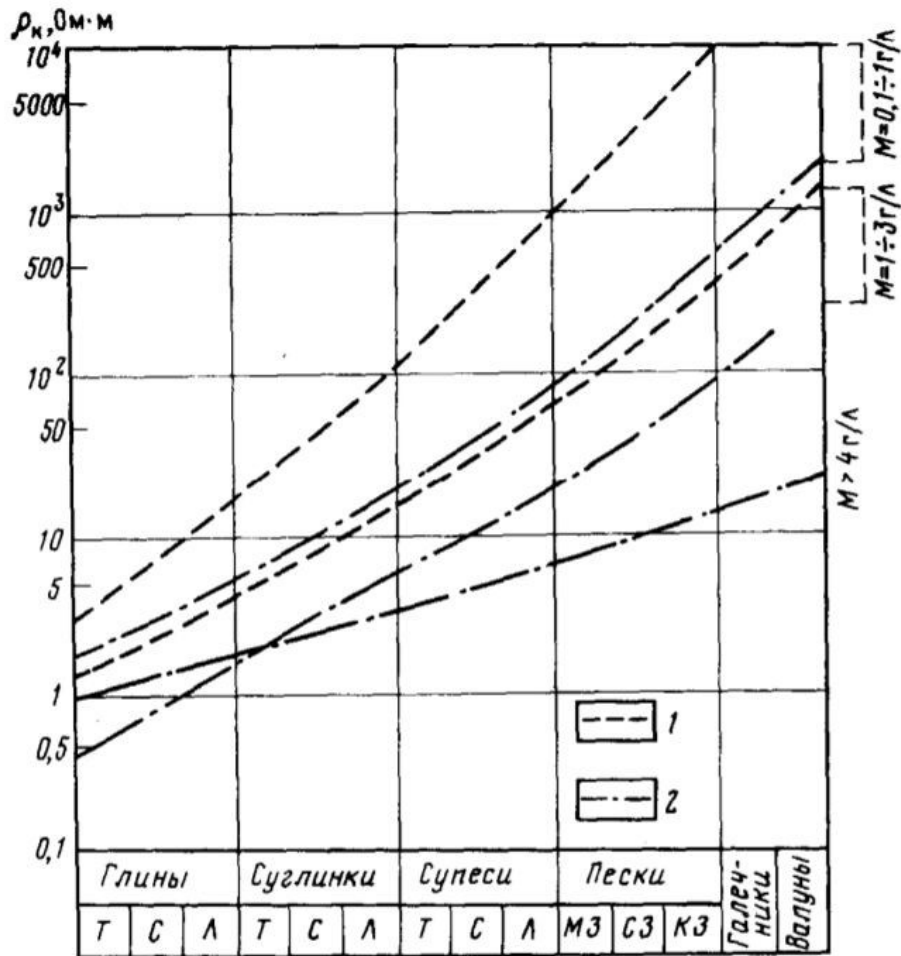
г - от минерализации жидкой фазы пород зоны аэрации при влажности более 10% (1 – супеси, 2- суглинки)

Связи между физико-механическими свойствами горных пород и косвенными геофизическими показателями, в своем абсолютном большинстве, носят не функциональный, а стохастический характер [64]. Выявить их можно на основе корреляционного анализа. Но даже при высоком значении корреляции (0.7 и выше), полученные зависимости могут “работать” только в пределах пород одного и того же состава и генезиса в определенных геологических провинциях и при одинаковом воздействии физических и вещественных полей.

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 ( $d_{ср}$ ) 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 2.6.

Изменение удельного электрического сопротивления рыхлых и слабосвязанных грунтов определяется количеством 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 (залегające выше зоны аэрации) или газонасыщенные породы характеризуются высокими значениями УЭС.



а)

Лито- логия	Глины			Суглинки			Супеси			Пески		
	Т	С	Л	Т	С	Л	Т	С	Л	МЗ	СЗ	КЗ
d <sub>ср</sub> , мм	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	0,002- 0,005	0,005- 0,01	0,01- 0,02	0,02- 0,05	0,05- 0,1	0,1- 0,2	0,2- 0,5	0,5- 1	1- 2
Г, %	≥65	≥50	≥40	≥30	≥20	≥15	15-20	12-15	10-12	10	5	0
е, %	60	40	20	55	45	25	50	40	30	50	40	30

б)

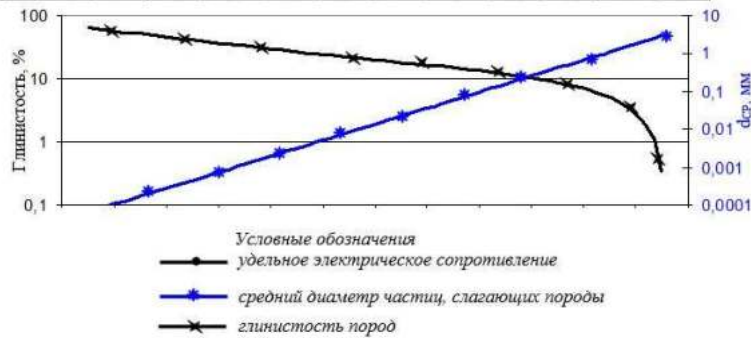


Рисунок 2.6 – Зависимость удельного электрического сопротивления (а) от литологического состава (б) при естественной влажности (1) и полного водонасыщения (2). Обозначения:  $d_{ср}$  – средний диаметр частиц, слагающих породы, Г – глинистость, е – коэффициент пористости, Т, С и Л – тяжелые, средние и легкие для соответствующих глинистых пород, МЗ, СЗ и КЗ – мелко-, средне- и крупнозернистые пески.

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 типичное 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

### 2.1.3 Сейсмические свойства песчано-глинистых грунтов

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 ее модуль Юнга  $E$ , в различных горных породах изменяется на несколько порядков - от уровня около 102 МПа в слабых осадочных образованиях

до уровня порядка 105 МПа (106 кг/см<sup>2</sup>) в крепких изверженных породах. За счет этого фактора величины сейсмических скоростей могут различаться в десятки раз.

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%. 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 и для сухого и водонасыщенного галечника 400 – 800 и 2000 – 2700 м/с соответственно. 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 2.7 показано влияние степени водонасыщенности на скорости продольных и поперечных волн. При степени водонасыщения ниже критической не наблюдается заметного влияния на скорость. При полном водонасыщении (более 90%) наблюдается резкое увеличение скорости продольных волн  $V_p$  и незначительное снижение скорости поперечных волн  $V_s$  [101].

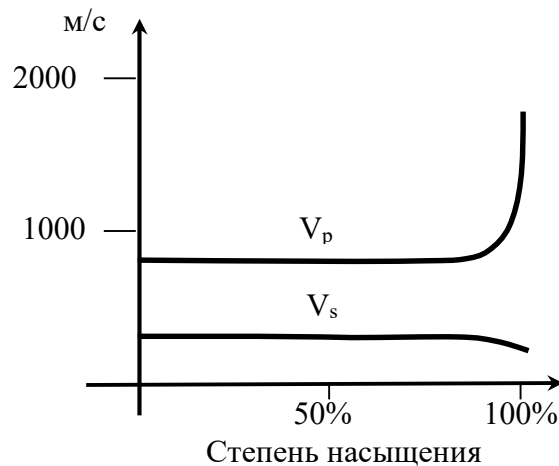


Рисунок 2.7 – Зависимость изменения скоростей продольных и поперечных волн от степени водонасыщения [101]

### *Глинистые породы*

Коренные глины характеризуются большими значениями  $V_p$ , нежели молодые четвертичные. 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 0.1 – 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 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; для лёссов 0.55 – 0.65 [56].

Существенным фактором для величин сейсмических скоростей является их пористость. Поскольку поры обычно заполнены флюидом – жидкостью или газом, то свойства пористой среды в целом определяются свойствами компонент: твердой минеральной фазы и флюида. 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].

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.

При прочих равных условиях, с увеличением пористости сухих пород породы сейсмические скорости в ней уменьшаются. Эта зависимость наиболее выражена в терригенных отложениях, у которых величина пористости может достигать 30 – 40%.

Зависимость скоростей  $V_p$  и  $V_s$  от объемной влажности  $\omega_v$  для песчано-глинистых пород изучена Н. Н. Горяиновым [26]. На рисунке 2.8 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.

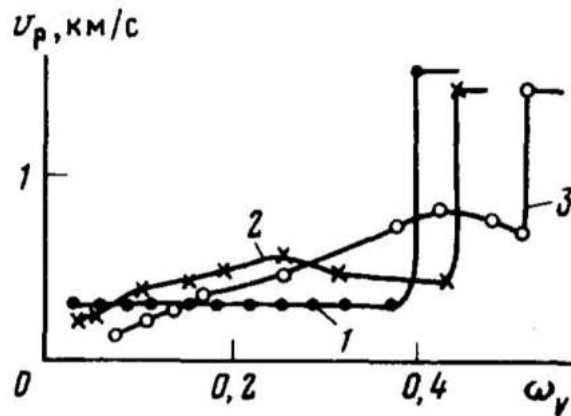


Рисунок 2.8 – Зависимость скорости продольных волн от объемной влажности для песчано-глинистых пород: 1 – песок,  $k_{п} = 40\%$ ; 2 – каолиновая паста,  $k_{п} = 44\%$ ; 3 – гидрослюдисто-каолиновая паста,  $k_{п} = 52\%$  [27]

Данные полевых наблюдений показывают [56], что при расположении уровня воды в четвертичных глинах и суглинках, как и в песках, наблюдается возрастание значений  $V_p$  ниже уровня воды 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 - 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. Особенно заметно влияние глубины на скорость волн в обломочно-суглинистых отложениях.

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].

С увеличением пористости снижаются модули упругости и прочность грунтов. Для рыхлых пород прочностные свойства помимо модуля всестороннего сжатия  $\sigma_{сж}$ , характеризуются сцеплением  $C$  и углом внутреннего трения  $\phi$ , определяющими сопротивление породы сдвигу. Оно обусловлено двумя причинами: внутренним трением между частицами грунта и сцеплением между отдельными частицами. 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. Оно возрастает с увеличением плотности.

Определенное влияние на сопротивление пород сдвигу оказывает пористость и плотность пород. Чем больше плотность, тем более частицы породы сближены друг с другом и, следовательно больше величина трения, возникающая между ними при сдвиге (Рисунок 2.9).

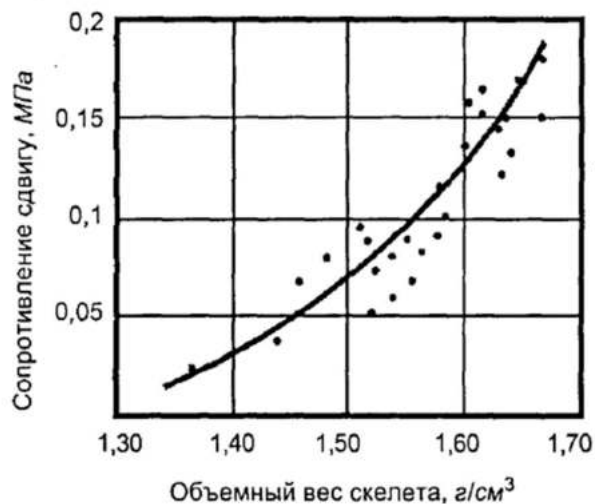


Рисунок 2.9 – График зависимости сопротивления сдвигу глинистой породы от ее плотности

Литологические границы в рыхлых породах являются слабыми как для продольных, так и для поперечных волн. Продольные волны, как правило имеют наиболее сильное преломление на границе УГВ и проследить с помощью их границы, залегающие ниже УГВ бывает проблематично в условиях слабого контраста скоростей. Поэтому для литологического расчленения разреза ниже УГВ целесообразно использовать поперечные волны. Так как они обладают более высоким разрешением по сравнению с продольными [5,96].

С ростом пористости уменьшается плотность породы, что в свою очередь сказывается на прочностных свойствах грунта и его скоростных характеристиках.

Обводнение рыхлых пород сильно нивелирует различия рыхлых пород по продольным волнам на литологических границах, 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]. Таким образом главным фактором изменения скорости поперечных волн в песчано-глинистом разрезе будет изменение пористости.

В связи со слабой дифференциацией по скоростным характеристикам песчано-глинистых пород, определяющее значение 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 некоторых осадочных пород, 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

Изменения скоростей поперечных волн возникают лишь за счет изменения плотности флюида и по масштабам они значительно меньше, чем для скоростей продольных волн. Поэтому выделить потенциально газонасыщенные участки только по скоростям поперечных волн затруднительно.

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 непосредственным образом 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 гг 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 внутрипорового давления флюида противоположно действию внешнего всестороннего давления. Повышение порового давления приводит к уменьшению эффективного давления, соответствующего разнице внешнего и внутрипорового давления, что приводит, в свою очередь, к уменьшению скорости и возрастанию затухания [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 некоторых 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

## 2.2 Инженерно-геологическое строение участка с зафиксированными газопроявлениями

По результатам бурения скважин на участке исследования было выявлено три 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  $C_{орг}$  в среднем составляет 0.25%. Отложения насыщены, в основном, легкими битумами. Средние значения физических свойств песчаных пластов участка исследований приведены в таблице 2.7.

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.

Наличие органики зафиксировано в осташковском, ленинградском, микулинском и московском горизонтах четвертичных отложений, при чем, газонасыщенные пески встречены в трех из них.

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.

Таблица 2.7 – Средние значения физических свойств песчаных пластов участка исследования

Название горизонта	Пористость, %	Плотность, 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

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 г/см<sup>3</sup>), 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 и аналитический расчет соотношения изотопов углерода в метане и газообразных углеводородных компонентах отобранного газа.

### **2.3 УЭС и скорости ФГМ песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа**

Непосредственно на участке исследований, по результатам обработки и интерпретации данных электроразведки и инженерно-геологических исследований, были получены следующие пределы значений УЭС для грунтов, формирующих геологический разрез участка исследования (таблица 2.8):

Таблица 2.8 – 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 Глины с включениями гравия и щебня	20 – 50

Как видно из приведенной выше таблицы, при интерпретации данных электроразведки, возникнет 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 и 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 10 – 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.

Окончательные значения УЭС для моделирования выбирались на основании результатов полевых электроразведочных работ.

В процессе моделирования необходимо рассмотреть следующие геоэлектрические модели:

1. Песчано-глинистый разрез с включением локальной неоднородности крупнообломочного материала с песчаным заполнителем.
2. Песчано-глинистый разрез с включением локальной неоднородности крупнообломочного материала с глинистым заполнителем.
3. Слой водонасыщенных песков в толще глинистых пород.
4. Слой газонасыщенных сухих песков мощностью 0.7 м, подстилающий слой водонасыщенных песков мощностью 2.2 м, в толще глинистых пород.

Таким образом, используя метод электротомографии применительно к исследуемому разрезу песчано-глинистых отложений представляется возможным 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.

Пределы изменений скоростей для моделей взяты согласно [63] и на основании результатов сейморазведочных работ. По данным сейморазведки были построены сейсмические границы корреляционным методом преломленных волн (Рисунок 2.10). 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 судя по всему 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.

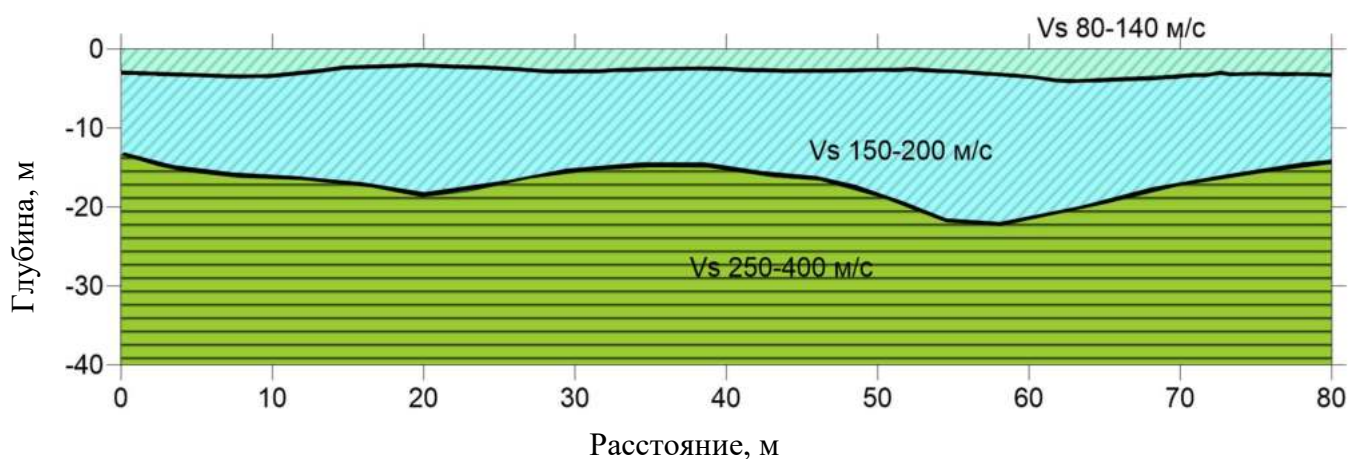


Рисунок 2.10 – Границы, выделенные по методу КМПВ песчано-глинистого разреза участка исследования

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.

Моделирование скоростей распространения продольных волн не выполнялось из-за слабого контраста скоростей в песчано-глинистом разрезе и высокого уровня грунтовых вод.

Скорости продольных и поперечных волн, типичные для участка исследования приведены в таблице 2.9:

Таблица 2.9 – 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, суглинок 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	250 – 300
Прослой песка газонасыщенного	1500	250
Микулинский горизонт, мгинская свита глины с высоким содержанием органики	1600	300
Московский горизонт, флювиогляциальные отложения пески, суглинки, ленточные глины Глины с включениями гравия и щебня	2000	500

#### **2.4 Комплексная электро- и сейсмогеологическая модель песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа**

Для обоснования оптимальной методики производства геофизических исследований по выявлению скоплений газа в песчано-глинистых грунтах ВЧР необходима комплексная физико-геологическая модель участка исследований включающая моделирование геофизических полей, целью которого является

получение восстановленных моделей по данным комплекса геофизических методов, с последующим их сопоставлением с первоначальными данными и оценкой возможностей применимости данных методов для решения задачи по выявлению газонасыщенных локальных неоднородностей.

В основу создаваемой комплексной физико-геологической модели положена геолого-геофизическая модель песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа и скоплениями валунно-галечного материала (Рисунок 2.11). Для построения модели были использованы на основе обобщения геологической информации, данных экспериментальных геофизических исследований и математического моделирования геофизических полей. Петрофизическая модель песчано-глинистого разрезом с наличием приповерхностных скоплений газа построенная на основе данных о геологическом строении участка работ и опытно-методических исследованиях на участке, где наблюдались газопроявления. Основанная на данных электро- и сейсмотомографии комплексная ФГМ должна обеспечивать детальное изучение неоднородностей песчано-глинистого разреза ВЧР с наличием приповерхностных скоплений газа с целью детального изучения межскважинного пространства, что позволяет на стадии выполнения проектно-изыскательских работ осуществить оценку газоопасности территории и устойчивости грунтов.

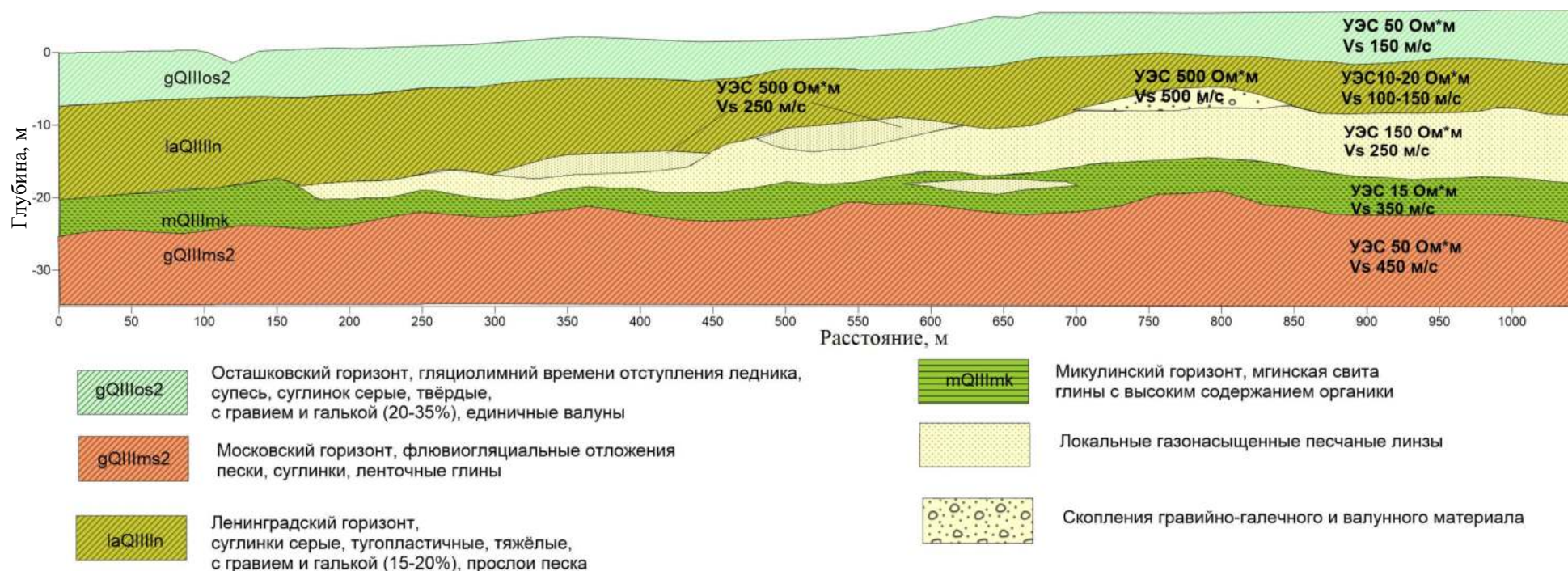


Рисунок 2.11 – Геолого-геофизическая модель разреза с включениями песчаных газонасыщенных линз, типичного для участка исследований, расположенного на ЮЗ Ленинградской области

Эффективность методов малоглубинной геофизики основывается на контрасте физических свойств пород или аномалий, поэтому при малых контрастах геофизических свойств или в силу действия принципа эквивалентности на различных объектах результаты геофизических методов могут давать неоднозначность в процессе геологической интерпретации. Моделирование геофизических полей, результатом которого является комплексная ФГМ, необходимо для выбора оптимальной методики производства геофизических исследований и оценки возможностей применимости данных методов для решения задачи по выявлению газонасыщенных локальных неоднородностей [52].

С учетом неоднородного строения песчано-глинистого разреза, для расчета параметров геофизических полей были параметризованы простые модели, отражающие различные варианты геологического строения разреза при исследовании участков с наличием приповерхностных газонасыщенных линз. Для расчета геофизических полей рассматривается три варианта песчано-глинистого разреза:

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

В первой модели рассмотрены фоновые составляющие значений УЭС и скоростей продольных и поперечных волн, характерные для песчано-глинистого разреза. Вторая и третья модели отражают аномальные составляющие с включением локальных неоднородностей, имитирующих включение газонасыщенного интервала и скопления гравийно-галечного материала (Рисунок 2.12).

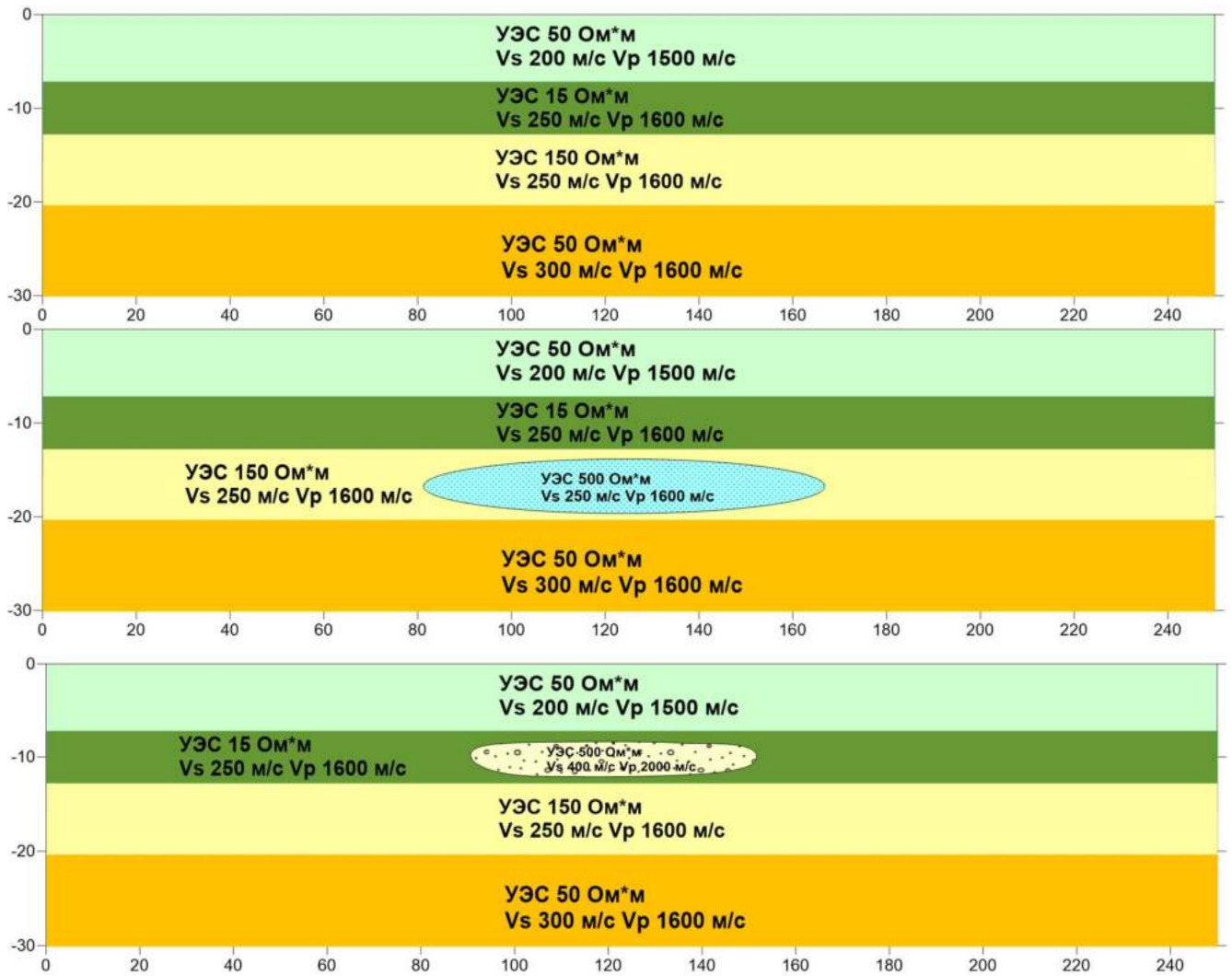


Рисунок 2.12 – Комплексные петрофизические модели неоднородного песчано-глинистого разреза

Каждая из моделей включает геолого-геофизическую модель, для которой проводится имитационное моделирование, т.е. синтезируются геофизические поля, на основе электро- и сейсмотомографических моделей участка исследования.

Целью математического моделирования является получение восстановленных моделей по данным методом 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.

Геоэлектрические и сейсмические поля, которые являются частью физико-геологической модели объекта исследования, могут быть получены вследствие синтеза теоретических полей, путем математического моделирования [61], и/или обобщения экспериментальных данных электро- и сейсмотомографических исследований песчано-глинистых разрезов с наличием приповерхностных скоплений газа

По результатам сравнения исходных моделей и данных, полученных, в результате инверсии можно делать предположения о возможности выделения аномалеобразующих объектов. Моделирование проводится с целью оценки разрешенности каждого из методов по выявлению целевых горизонтов и выработки оптимальной методики проведения полевых сейсморазведочных и электроразведочных работ. Комплексирование различных геофизических методов позволяет интерпретировать объекты, обладающие эквивалентными свойствами.

Представленные петрофизические модели синтезированы на основании результатов геофизических и инженерно-геологических исследований газопроявлений на участке строительства объекта газотранспортной инфраструктуры в Ленинградской области.

#### **2.4.1 Результаты моделирования электротомографических разрезов**

В программном продукте Res2Dmod для решения прямой задачи электроразведки используются методы конечных разностей и конечных элементов [106-108]. Основным принципом метода конечных элементов является разбиение области, в которой решается краевая задача на ряд относительно небольших подобластей (конечных элементов) и аппроксимация неизвестной функции на каждом элементе комбинацией некоторых базовых функций.

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 установкой Шлюмберже AMN+MNB с разносами АО от 7.5 м до 122.5 м., которая имеет хорошее горизонтальное покрытие и обеспечивает достаточную глубинность. Что бы избежать асимметрии результата инверсии, при расчете комбинировались измерения «прямой и обратной» трехэлектродными установками.

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

Результаты моделирования геоэлектрических разрезов представлены на рисунках 2.13 и 2.14. Очевидно, что геоэлектрические разрезы для моделей с включением газонасыщенной песчаной линзы и валунно-галечного материала будут идентичны.

Оценка результатов инверсии проводилась на качественном уровне, основной задачей было выделение высокоомных аномалий, связанных с интервалами газонасыщенных песчаных линз и крупнообломочного материала. Газонасыщенный интервал разреза и вмещающие песчано-глинистые грунты обладают контрастными значениями УЭС, отличающимися на порядок для глин, суглинков и водонасыщенных песков, что позволяет интерпретировать отдельные горизонты песчано-глинистого разреза.

Сопротивление вмещающих песчано-глинистых грунтов, обладающих невысокими значениями УЭС (порядка 15 – 100 Ом·м) восстанавливается с достаточно хорошей точностью. Высокие значения сопротивления, соответствующие газонасыщенным интервалам разреза или скоплениям валунно-галечного материала восстанавливаются с достаточно большой погрешностью, вследствие предусмотренного программным алгоритмом гладкого распределения параметров модели. Однако, геометрические характеристики и контраст на фоне

вмещающих грунтов локальной неоднородности, сформированной скоплением газа в песчаной линзе, заданные в начальной модели, удается восстановить с достаточной точностью.

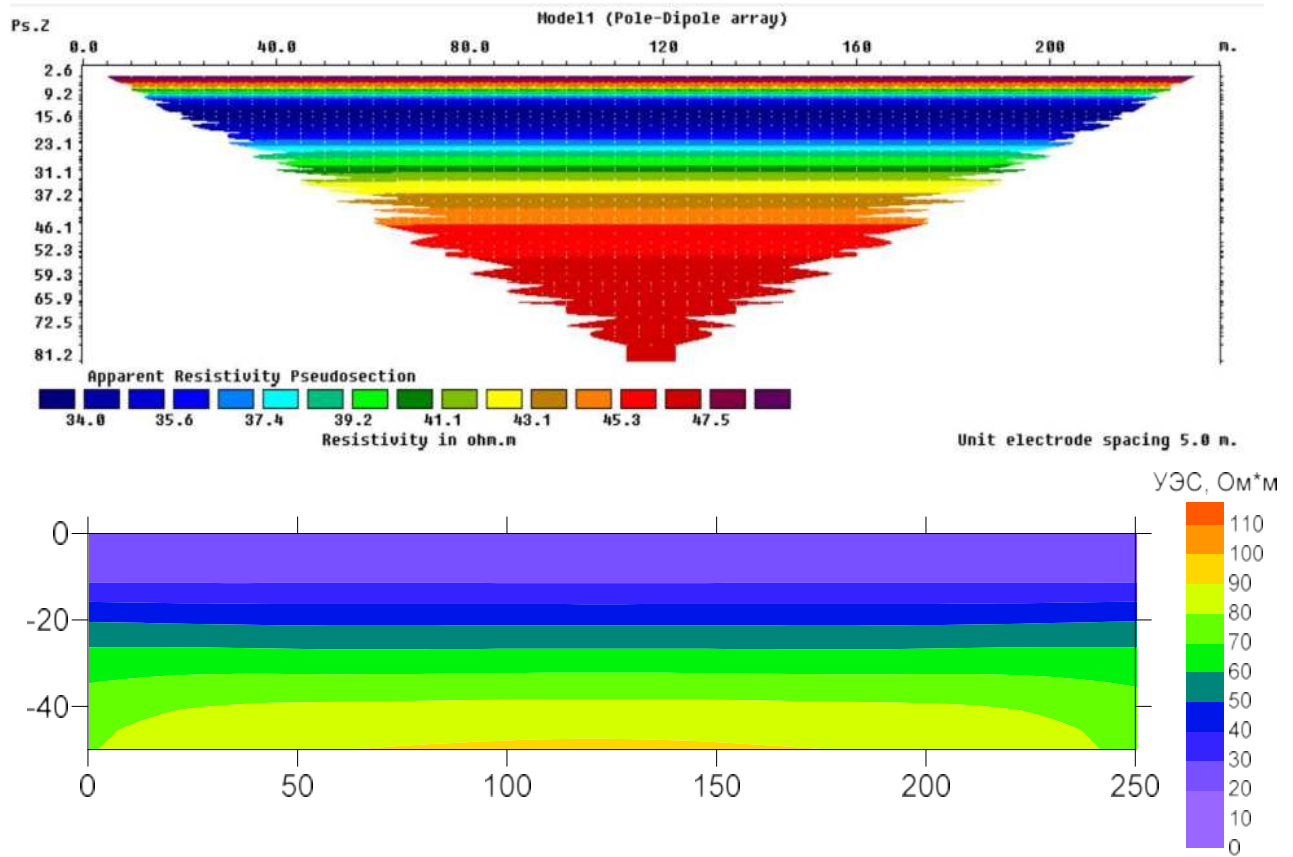


Рисунок 2.13 – Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели неоднородного песчано-глинистого разреза

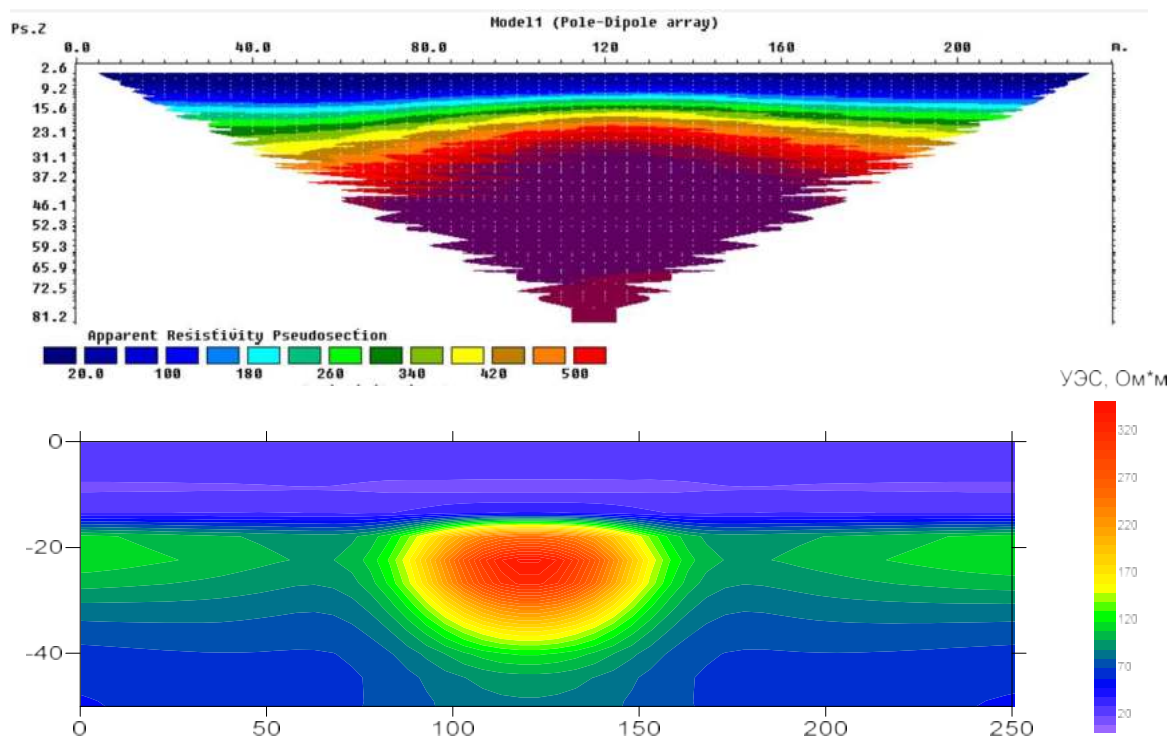


Рисунок 2.14 – Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии для модели неоднородного песчано-глинистого разреза с включением локальной неоднородности (газонасыщенная песчаная линза, скопление валунно-галечного материала)

#### 2.4.2 Результаты моделирования скоростных сейсмотомографических разрезов

Для решения задач построения синтетических сейсмотомографических разрезов песчано-глинистых разрезов с наличием приповерхностных скоплений газа использовался пакет программ пакет XТomo-LM. Прямая задача для заданной системы наблюдений решается для указанного набора волн, среди которых могут быть непрерывно рефрагированная (ныряющая), отраженные и головные. 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 модели представленной модели песчано-глинистого разреза задачей сейсмической томографии будет локализации локальных неоднородностей, связанных с включениями гравийно-галечного и валунного материала. выполнено компьютерное моделирование сейсмотомографических разрезов для Модели 1 и Модели 3 (Рисунок 2.15), аналогичных по геологическому строению моделям, на которых выполнялось моделирование УЭС. Моделирование сейсмотомографических разрезов выполнялось только для скоростей поперечных волн  $V_s$ . Параметры системы наблюдения были выбраны в соответствии с характеристиками аппаратуры, используемой для проведения полевых исследований и априорной информацией об исследуемом объекте (размерах и глубине залегания). Для расчета сейсмотомографических моделей использовался пакет программ XТomo-LM. Длина профиля – 235 м, с шагом расстановки: пункты приема (ПП) – 5 м, пункты возбуждения (ПВ) – 5 м.

Пределы изменений скоростей 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, 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 10 – 15%.

Моделирование скоростей распространения продольных волн не выполнялось из-за слабого контраста скоростей в песчано-глинистом разрезе и высокого уровня грунтовых вод.

На рисунке 2.15 представлено решение прямой задачи, для модели песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине и модели с включением более высокоскоростной неоднородности, имитирующей скопление валунно-галечного материала. На этапе решения прямой задачи были рассчитаны времена прихода первых вступлений преломленных волн, для которых на следующем этапе была выполнена инверсия времен первых вступлений (Рисунок 2.16).

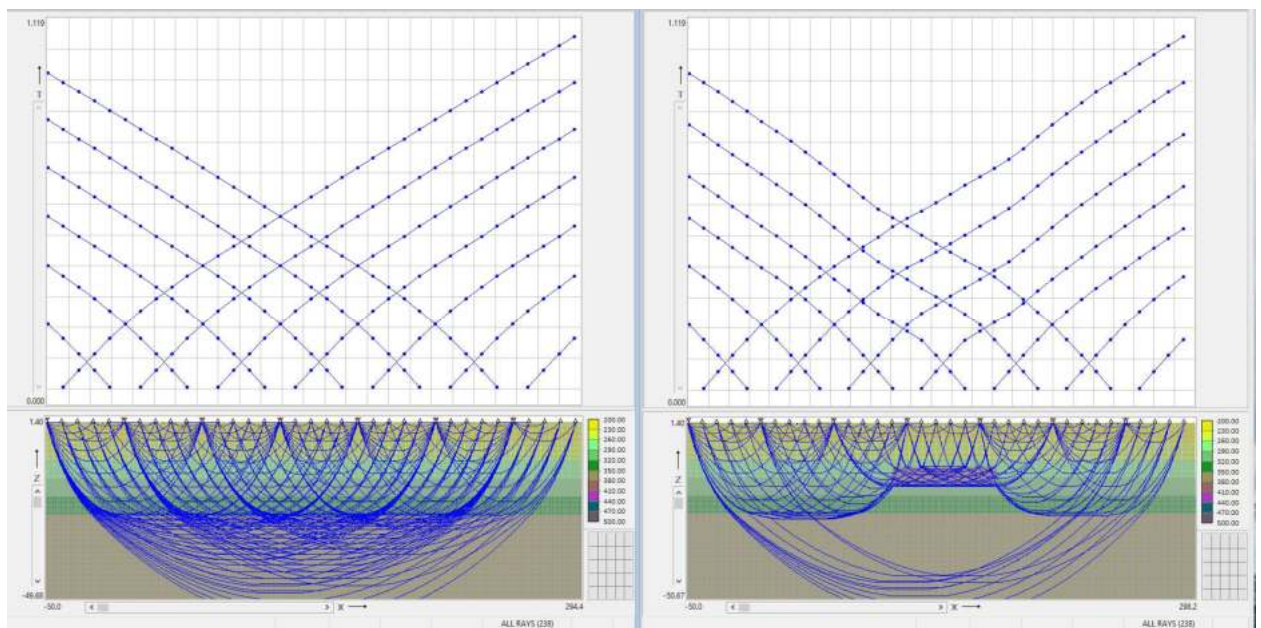


Рисунок 2.15 – Годографы первых вступлений поперечных волн для моделей песчано-глинистого разреза с плавным нарастанием скорости по глубине (слева) и с включением высокоскоростной неоднородности, имитирующей скопление валунно-галечного материала (справа)

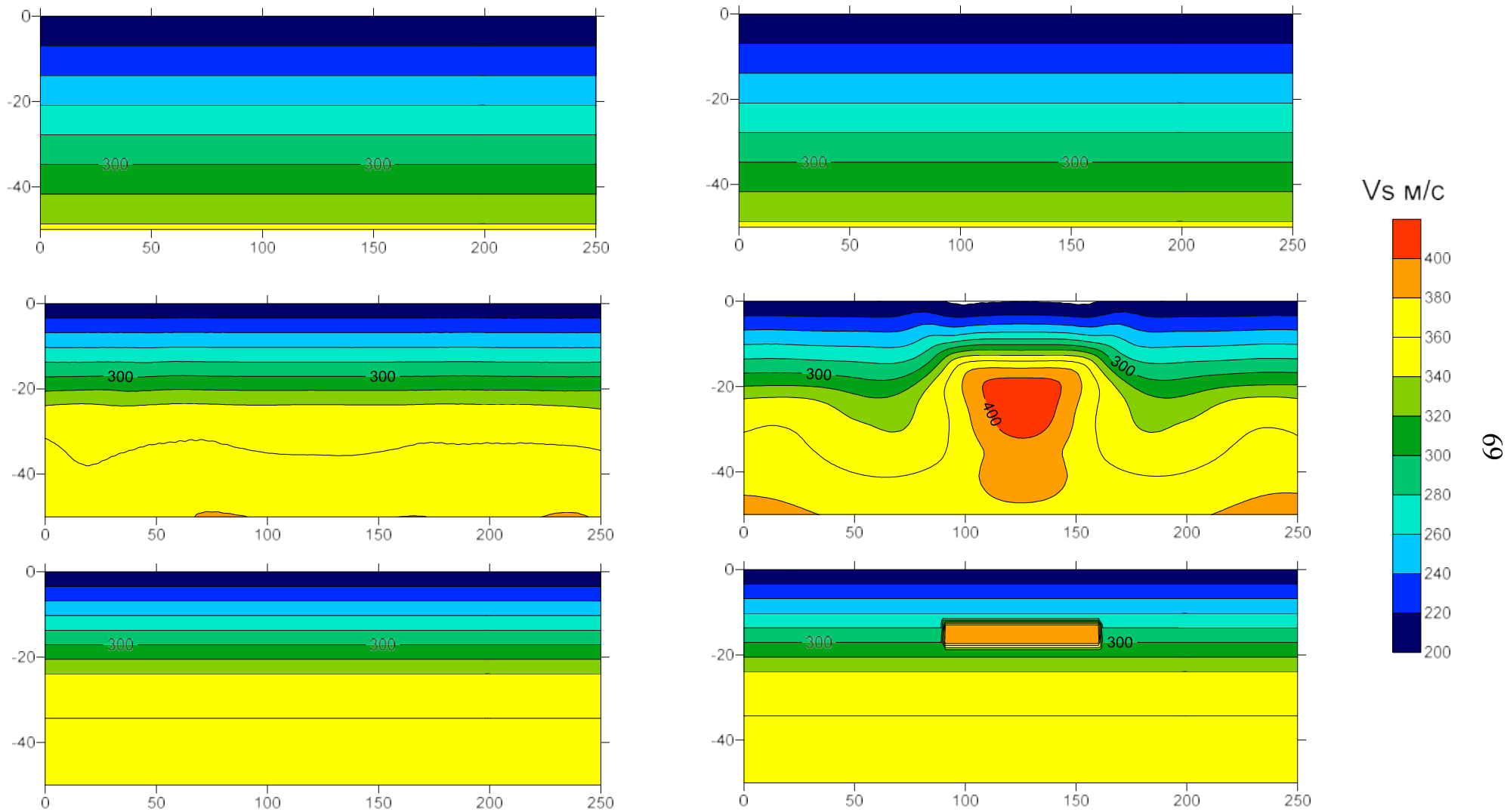


Рисунок 2.16 – Скоростные разрезы поперечных волн для моделей песчано-глинистого разреза с плавным нарастание скорости по глубине (слева) и с включением высокоскоростной неоднородности, имитирующей скопление валунно-галечного материала (справа)

## 2.5 Выводы к главе 2

1. Свойства рыхлых пород верхней части разреза могут быть представлены как многокомпонентные смеси разных типов пород литологического ряда глина-суглинок-супесь-песок и основными факторами, их определяющими, является пористость и влажность пород.
2. По данным электротомографии представляется возможным 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.
3. Из-за наличия в разрезе скоплений валунно-галечного материала возникает неоднозначность интерпретации областей повышенных значений УЭС, порядка 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 и крупнообломочного материала.
4. Результаты выполненного численного моделирования для комплекса геофизических методов, включающего сейсмотомографию и электротомографию позволяют выделить участки связанные с возможными скоплениями газа.

### ГЛАВА 3 КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМО- И ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИНЗ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Не существует прямых геофизических методов, позволяющих однозначно выявить участки газонасыщения в толще песчано-глинистых грунтов, но можно предложить методику комплексных геофизических исследований, позволяющую определить участки, возможного распространения газонасыщенных песков. Практическая значимость такого комплекса связана с повышением эффективности бурения за счет его целенаправленного применения в потенциально опасных зонах и повышением безопасности изыскательских работ путем планирования при работах на этих участках особых мер предосторожности – использование дополнительных средств индивидуальной защиты персоналом, регулярный контроль воздуха с помощью газоанализаторов и т.п.

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 целом, при интерпретации данных любого геофизического метода, возникают следующие затруднения:

1. Неоднозначность решения обратной задачи по определению геологической природы, размеров и геометрии изучаемых объектов;
2. Отсутствие, как правило, прямых сигналов от геологических объектов и процессов, т.е. изучение объектов, процессов и явлений проводится путем измерения косвенных признаков;
3. Искажения регистрируемых сигналов (аномалий) от изучаемых объектов помехами различной природы геологического (неоднородности верхней части разреза, экраны, влияние рельефа и подстилающих пород и т.д.) и негеологического (временные вариации полей, промышленные токи, технические сооружения, ошибки в методике и технологии наблюдений и т.п.) характера [39].

### **3.1 Предпосылки комплексирования методов электроразведки и сейсморазведки**

Разрабатывая комплексную методику, для решения задачи по поиску зон газонасыщения в песчано-глинистых грунтах, необходимо оценить возможности использования и ограничения геофизических методов, наиболее часто применяемых в ходе инженерно-геологических исследований – электроразведки и сейсморазведки.

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

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

Цель 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, нехарактерными для геологического разреза района работ.

Электроразведочные работы позволяют оперативно изучить значительную территорию и выделить зоны повышенных значений УЭС в плане и разрезе.

По результатам моделирования и анализа данных УЭС грунтов участка исследования, описанного в главе 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 и скоплениями крупнообломочного материала.

Поэтому для уточнения природы аномалий высокого удельного электрического сопротивления необходимо дополнить комплекс методом сейсморазведки, по результатам которой возможно интерпретировать скопления крупнообломочного гравийно-галечного материала, так как они будут выделяться на сейсмических разрезах более высокими скоростями поперечных волн, по сравнению с вмещающими песчано-глинистыми грунтами.

Для геологической интерпретации высокоомных аномалий и определения какие из них относятся к скоплениям крупнообломочного материала и включениям в толщу и глин и суглинков, а какие могут быть связаны с линзами газонасыщенных песков, возможно применение сейсморазведки методом МПВ на участках, где ранее были выполнены электроразведочные работы и выявлены зоны высоких значений УЭС.

Из анализа скоростей продольных и поперечных волн для участка исследований проведенного для создания ФГМ участка исследования в Главе 2 видно, что при интерпретации данных 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 в основном данных сейсморазведки на поперечных волнах, так как изменение влажности и даже переход в состояние

полного водонасыщения, не оказывает практически никакого влияния на скорость  $V_s$  [63];

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

Тем не менее, сейсморазведка МПВ позволяет по распределению скоростей поперечных волн получить необходимую для решения поставленной задачи информацию, и отнести выявленную высокоомную аномалию к скоплению крупнообломочного материала (включений в глинистой толще).

Основным критерием является изменение скорости распространения поперечных волн в области, которая была ранее выделена по результатам электроразведки.

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 в целом повышает скорость распространения упругих волн. В случае, если  $V_s$  не меняется, мы можем предположить, 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 плотности и, следовательно, на скорости поперечных волн водо- и газонасыщение оказывает слабое влияние [1].

### **3.2 Совместный анализ данных электроразведки и сейсморазведки**

Выявление газонасыщенных пород на электро- и сейсмотомографических разрезах является непростой задачей в условиях неоднородной верхней части геологического разреза, представленного дисперсными породами. Различить изменения литологического состава от газопроявлений на геоэлектрических и скоростных томографических разрезах трудно, так как прямые диагностические признаки распознавания отличий отсутствуют. Различные геологические факторы

могут формировать неоднородности с практически одинаковыми геофизическими параметрами [53].

Грунты как многокомпонентные системы, состоящие из твердой, жидкой и газовой компонент, а также биотической составляющей [27], не являются однородными упругими средами. Они представляют собой гетерогенные среды, при распространении волн напряжений в которых происходит потеря энергии не только за счет геометрического расхождения волнового фронта, но и отражения, и преломления на границах [28], рассеяния энергии на различного рода неоднородностях, имеющихся в массиве горных пород, поглощения, как за счет неидеальной упругости, так и вязкости среды, а также релаксации напряжений [48].

Можно ожидать, что основным индикатором газопроявлений является увеличение декремента поглощения сейсмических волн в газонасыщенных песках. Поэтому, наряду с традиционными видами томографических 2D инверсий, использовалась технология амплитудной томографии, позволяющая получить оценку пространственного 2D распределения значений декремента поглощения в изучаемом геологическом разрезе. 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 [51].

Для повышения достоверности получаемых данных проведена оценка распределения декремента поглощения упругих волн, получаемая в результате обработки данных сейсморазведки по методике амплитудной томографии. Методика позволяет получить разрез декремента поглощения в среде из значений амплитуд первых вступлений на основе предварительно полученного скоростного разреза.

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 расстояние 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)

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

где  $\lambda$  – длина волны,

$\omega$  – круговая частота колебаний,

$v$  – скорость распространения волны.

Использование декремента поглощения удобно тем, что он слабо зависит от частоты.

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 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 площади и в разрезе высокоомные аномалии, которые могут быть связаны с газонасыщенными песками и неоднородностями в глинистой толще.
2. 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 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 ключевые признаки для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных скоплений газа, можно в виде таблицы 3.1, которая объединяет признаки-индикаторы наличия скоплений газа в разрезе по характеру изменения геофизических параметров – удельного электрического сопротивления, скорости поперечных волн, декремента поглощения.

Таблица 3.1 – Критерии для интерпретации данных геофизических исследований песчано-глинистого разреза с наличием локальных неоднородностей

Интервал песчано-глинистого разреза	Удельное электрическое сопротивление	Скорость распространения поперечных волн	$\delta s$ 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	Незначительные изменения	Повышение

### 3.3 Обоснование комплекса методов геофизических исследований

При разработке методики комплексных геофизических исследований участков газопроявлений в песчано-глинистых грунтах ВЧР необходимо учитывать большое количество факторов, влияющих на общую эффективность предлагаемого решения.

1. Возможность решить инженерно-геологические задачи:

- изучение верхней части разреза, где газогенерация может быть связана с толщей обогащенных органическим веществом болотных, морских, озерно-ледниковых отложений;
- литологическое расчленение песчаных и глинистых отложений и выделение возможно газопродуктивных суглинков и глин с высоким содержанием органики;
- определение положения кровли коренных пород и выявление участков, которые могут быть связаны с локальными газопроявлениями.

2. Теоретическая оценка применимости данного комплекса методов на основе результатов проведенного математического моделирования геофизических полей.

3. Практические результаты работ различными геофизическими методами на участке исследований.

4. Применимость с точки зрения производственных работ в рамках выполнения инженерных изысканий:

- соответствие действующей нормативно-технической документации [85];
- широкое практическое применение при выполнении инженерных изысканий;
- экономическая эффективность

Исходя из перечисленных выше требований, для выявления областей скопления газа в верхней части разреза наиболее подходит комплекс геофизических методов, включающий электроразведку и сейсморазведку, в модификации геоэлектрической и сейсмической томографии.

### 3.3.1 Электроразведка методом ВЭЗ 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. 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 и разработка и программная реализация математических алгоритмов, позволяющих выполнять двумерную, а затем и трехмерную инверсию 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 решению задачи выявления областей газонасыщения в разрезе электротомография позволяет решить две задачи:

- расчленение литологического разреза на 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*

Для сбора полевых данных электроразведки использовалась электроразведочная станция «Скала-48», рисунок 3.1.

Измерения выполнялись с помощью двухсегментной косы, предназначенной для коммутации 48 электродов по 24 электрода в каждом сегменте. Шаг расстановки электродов 5 м. В качестве приемных и питающих электродов использовались металлические шпильки.



Рисунок 3.1 – Выполнение электроразведочных работ с использованием многоканальной электроразведочной станции

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. При работе по такой схеме 25-й электрод предыдущей расстановки становился первым

в следующей. Таким образом, с каждой дополнительной расстановкой длиной 235 м захватывался новый сегмент изучаемого разреза протяженностью 120 м. Соответственно, для изучения разреза вдоль линии длиной X, была выполнена съемка 1,5X профилей электротомографии (Рисунок 3.2) [8].

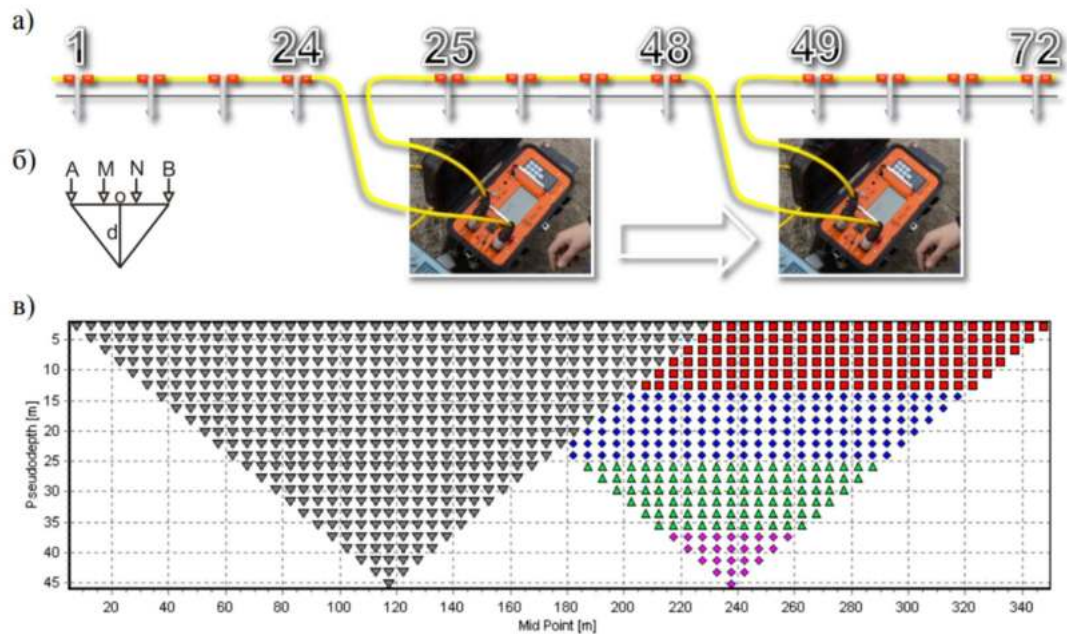


Рисунок 3.2 – (а) Схема расположения двух сегментов 24х-электродных кос с последующим переносом первого сегмента для непрерывного продолжения профиля. Вид протокола измерений (v) для электротомографии.

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

Выбор оптимальной методики электроразведочных работ и типа измерительных электроразведочных установок осуществлялся в процессе исследований в соответствии с геологическими и геоэлектрическими условиями конкретных участков работ.

Предварительная камеральная обработка результатов электроразведочных измерений в виде визуализации данных в разрезе кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС) выполнялась в полевых условиях для оперативной оценки качества первичных данных (Рисунок 3.3).

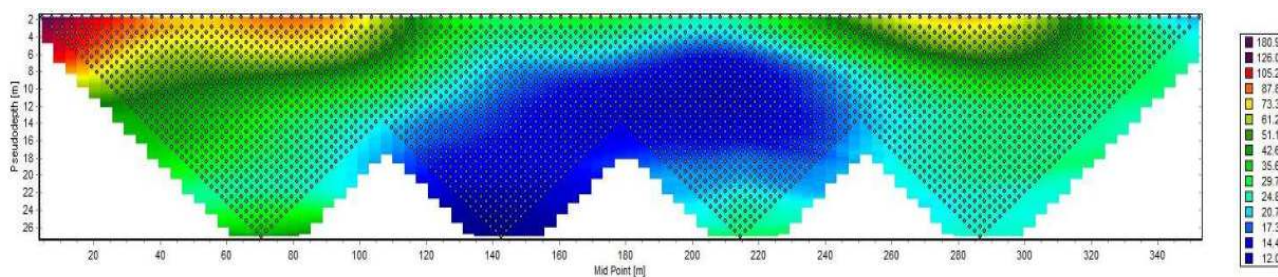


Рисунок 3.3 – Пример разреза КУЭС, получаемого оператором в поле

Электроразведочные наблюдения проводились по системе параллельных профилей.

При неблагоприятных условиях для гальванических заземлений применялось группирование удлиненных электродов и подлив минерализованной воды, что позволило компенсировать влияние плохих поверхностных условий заземления и обеспечить силу тока в цепи АВ, необходимую для устойчивых измерений величины  $\Delta U$ .

#### *Обработка и интерпретация результатов ГЭТ*

Визуализация и инверсия данных геоэлектрической томографии выполнялась 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 поле. 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 геоэлектрической томографии 2D модели геоэлектрических разрезов, характеризующие распределение УЭС по профилям геофизической съемки, визуализируются с помощью программы Surfer. При регулярном расположении профилей, также возможно построение карт, отражающих распределение кажущегося удельного электрического сопротивления на разных глубинах.

### **3.3.2 Сейсморазведочные исследования**

Сейсморазведочные исследования выполнялись с целью:

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

#### *Методика проведения полевых сейсморазведочных исследований*

При проведении наземных сейсмических исследований возбуждались и регистрировались поперечные S- и продольные P-волны. Регистрация поперечных SH-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 3.4).



Рисунок 3.4 – 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 выполнялось два противоположно направленных ПВ, после суммирования которых рассчитывалась поперечная волна (Рисунок 3.5).

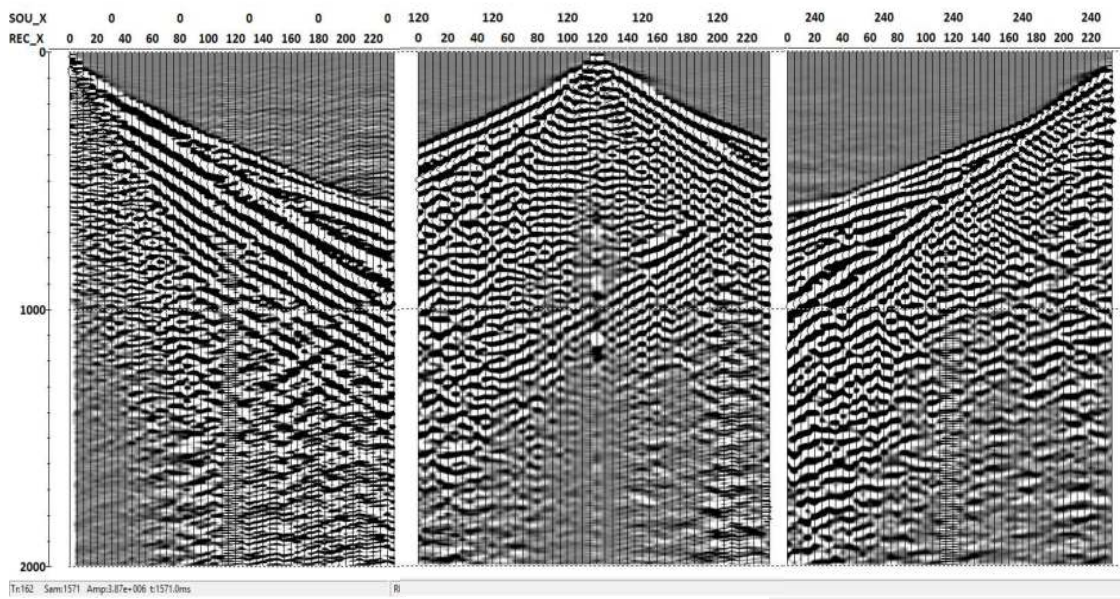


Рисунок 3.5 – Пример сейсмограммы ОПВ.  $Y-Y$  расстановка, S-волны

Для улучшения отношения «полезный сигнал»/«помеха» на каждом пункте возбуждения (ПВ) осуществлялось 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.

Максимальная длина 48-ми канальной установки при размещении пунктов приема (ПП) через 2 м и 6 выносах ПВ (по три с каждой стороны косы) с шагом 4 м, 8 м и 12 м составила 106 м. Пункты возбуждения (ПВ) располагались вдоль косы с шагом 4 – 6 м. При выполнении съемки с использованием 2-х метровых кос при перемещении всей сейсмической расстановки выполнялось перекрытие расстановок в 24 канала.

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. На рисунке 3.6 приведены типичные сейсмограммы, зарегистрированные в ходе выполнения работ на участке исследования с зафиксированными газопроявлениями.

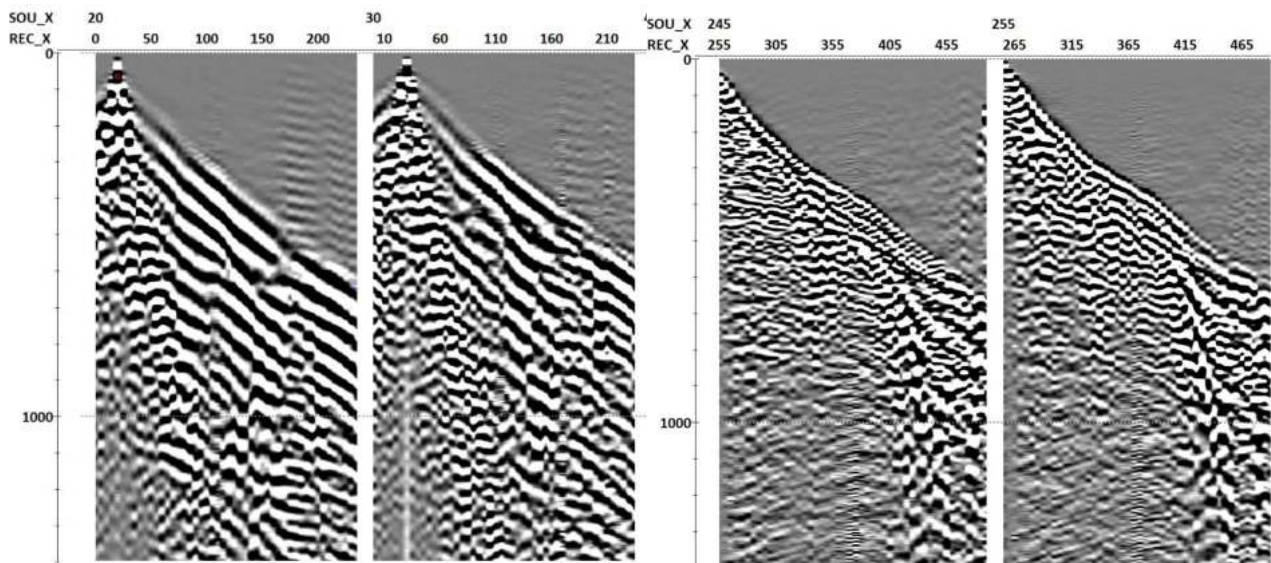


Рисунок 3.6 – Примеры типичных сейсмограмм, зарегистрированных в ходе проведения исследования

Для такого разреза эффективным методом 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 выполнялась с помощью пакета программ Xtomo и DPU 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. На третьем этапе выполняется томографическая инверсия годографов первых вступлений с итерационным уточнением скоростной модели среды.

В результате обработки данных сейсморазведки методом сейсмической томографии были получены сейсмотомографические разрезы, характеризующие распределения скоростей поперечных волн в разрезе (Рисунок 3.7).

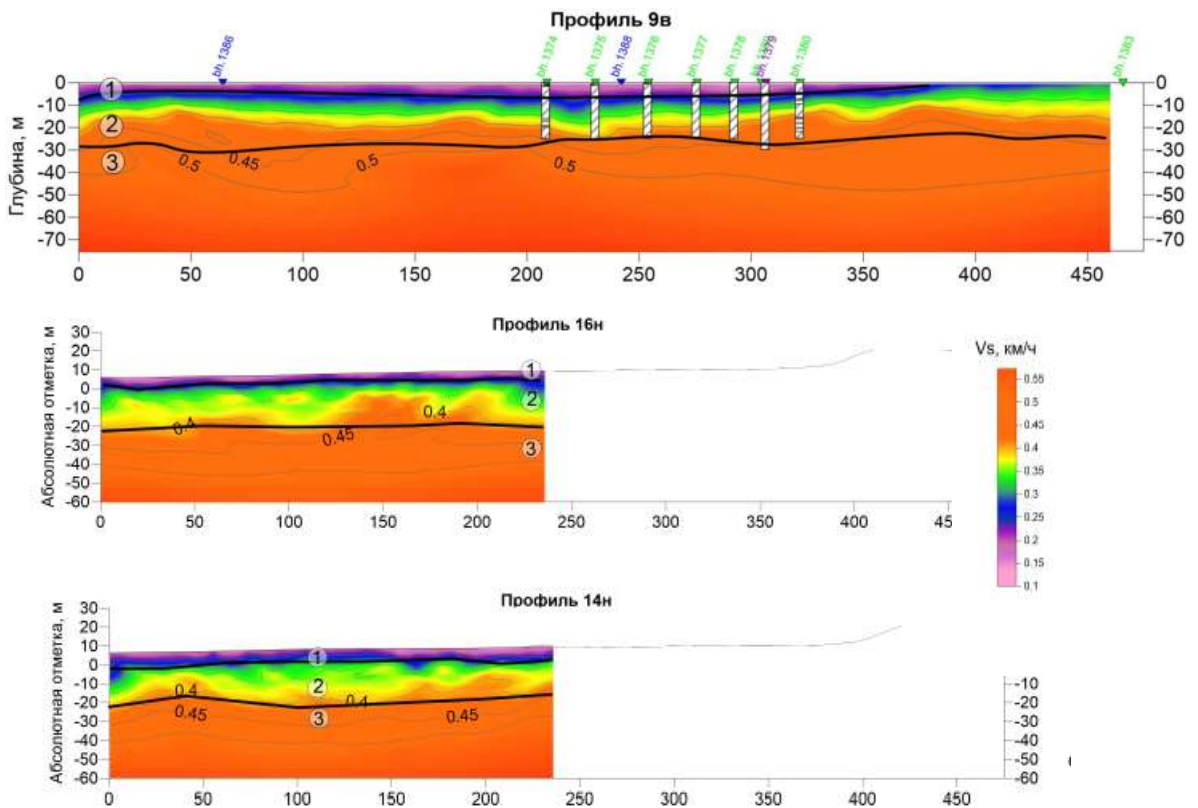


Рисунок 3.7 – Сейсмотомографические разрезы скоростей поперечных волн

### 3.4 Обработка данных сейсморазведки с применением амплитудной томографии

Как было описано выше (Таблица 3.1), 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, использовалась технология амплитудной томографии, позволившая получить оценку пространственного 2D распределения значений декремента поглощения в изучаемом геологическом разрезе.

Разрезы декремента поглощения сейсмических волн были 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].

Алгоритм инверсии амплитуд (Рисунок 3.8) использует те же основные настройки, 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.

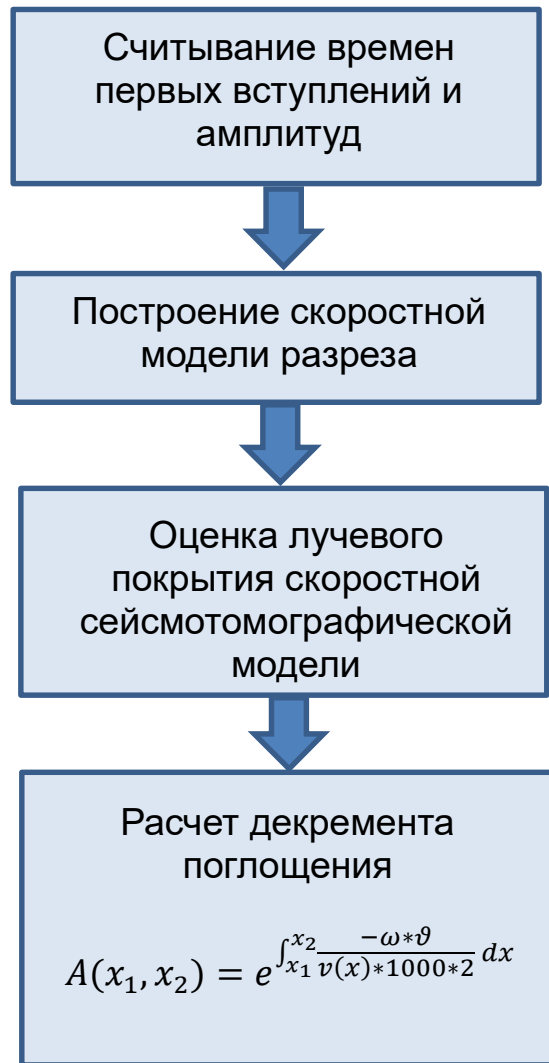


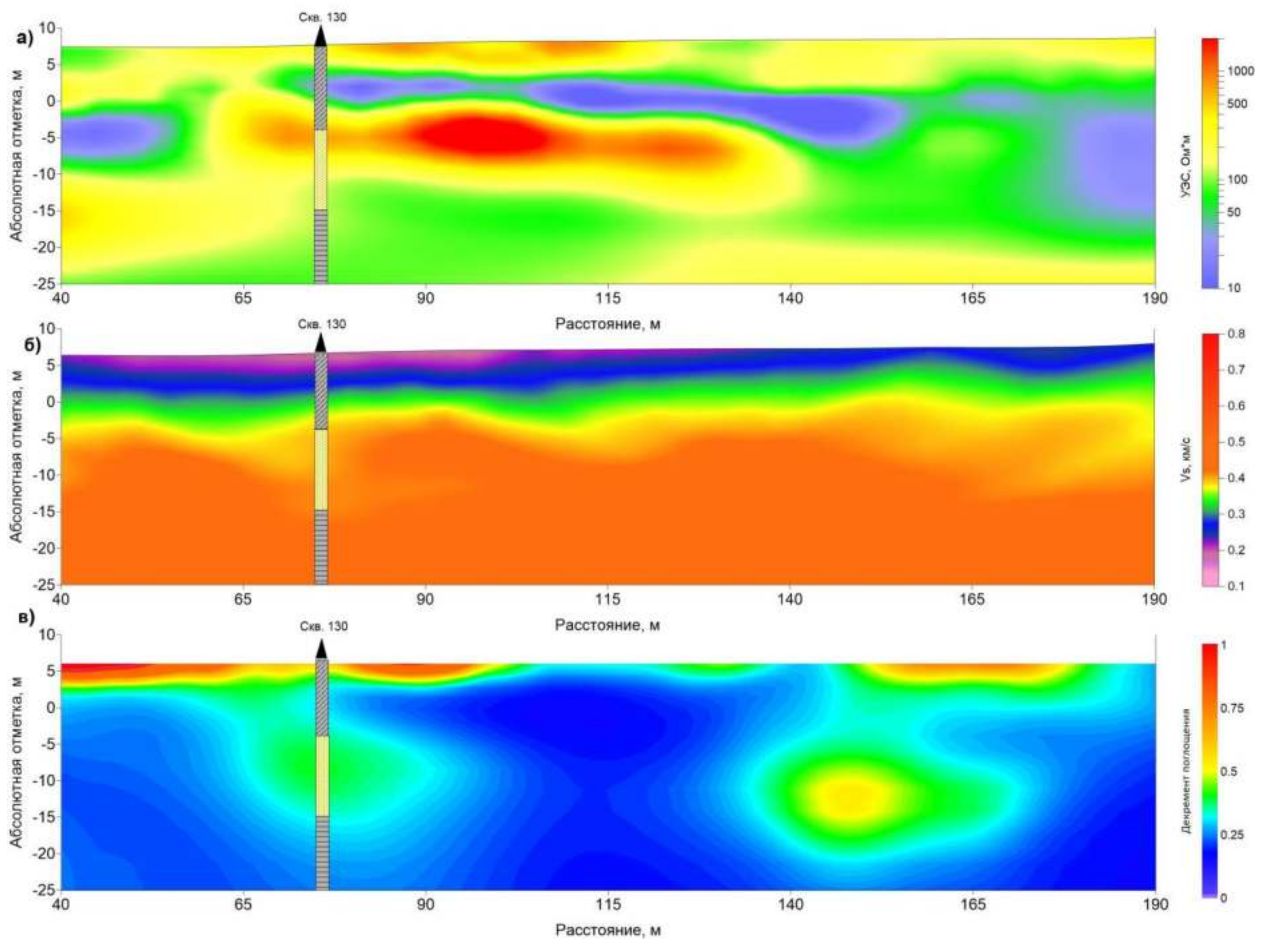
Рисунок 3.8 – Алгоритм расчета декремента поглощения в программе ZondST2D [70]

### 3.5 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 130, где были зафиксированы наиболее сильные и продолжительные по времени выбросы газа. На момент проведения опытных работ, выход газа на скважине 130 фиксировался уже более года.

Результаты совместной обработки данных электроразведочных и сейсморазведочных работ представлены на рисунке 3.9. Представлен интервал профиля ПК40 – ПК190, на котором в районе ПК75 находится скважина 130, где газопроявления наблюдались в течение длительного времени. Приведены результаты обработки данных в виде разрезов:

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



Условные обозначения:




-  - пески водонасыщенные с включениями гравия и щебня
-  - суглинок, с прослоями песка, супеси и включениями гравия до 20%
-  - глина с включениями гальки, мелкими раковинами

Рисунок 3.9 – Результаты геофизических исследований: а) геоэлектрический разрез; б) сейсмотомографический разрез; в) разрез декремента поглощения

В результате работ методом геоэлектрической томографии (Рисунок 3.9а) была выделена высокоомная аномалия в интервале ПК65 – ПК140, значения УЭС этой области более 500 Ом·м. По данным бурения скважины 130 в этой области были вскрыты суглинки с прослоями песка и супеси и с включениями 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 хорошо видно на 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 на этом интервале разреза, меняется незначительно (Рисунок 3.9 б). Некоторое понижение скорости  $V_s$ , наблюдаемое в интервале ПК70 – ПК80 и в районе скважины 130 может быть связано как газонасыщением, так и со сменой литологии – пески/суглинки и с изменением количества включений гравия, 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 мы получаем второй признак-индикатор газонасыщенной зоны – незначительное снижение или неизменность скорости распространения поперечных волн.

На рисунке 3.9в показан результат инверсии методом амплитудной томографии. На разрезе хорошо видна область возрастания декремента поглощения в интервале ПК70-ПК80 и скважины 130. Получен третий признак-

индикатор наличия области газонасыщения – значительное возрастание декремента поглощения. На 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 (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.

### 3.6 Выводы к главе 3

1. Комплексные геофизические исследования, включающие методы сейсморазведки и электроразведки позволяют решить задачу по выделению участков, возможно связанных с газопроявлениями, что подтверждается данными бурения;
2. Метод сейсмотомографии с использованием первых вступлений не позволяет однозначно выделить газонасыщенные линзы, слабоконтрастные по скоростным свойствам;
3. Включение в процесс обработки и интерпретации данных сейсморазведки амплитудной сейсмической томографии и анализ распределения коэффициента поглощения в разрезе позволяет значительно повысить качество интерпретации геофизических материалов и более точно определять целевые объекты при изучении процессов газопроявлений; Линзы газонасыщенных песков и линзы песков различаются по затуханию можно разделить по поглощению – газонасыщенные пески характеризуются повышенным поглощением [53].
4. 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.

## ГЛАВА 4 ВЫЯВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ГАЗА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ НА ПЛОЩАДКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Внедрение и опробование предложенной в Главе 3 методики комплексных геофизических исследований было выполнено в рамках научно-исследовательских работ по выявлению интервалов возможного газопроявления на площадке проектируемого объекта газотранспортной инфраструктуры, расположенном на Юго-Западе Ленинградской области в Кингисеппском районе в долине реки Луга (Рисунок 4.1).

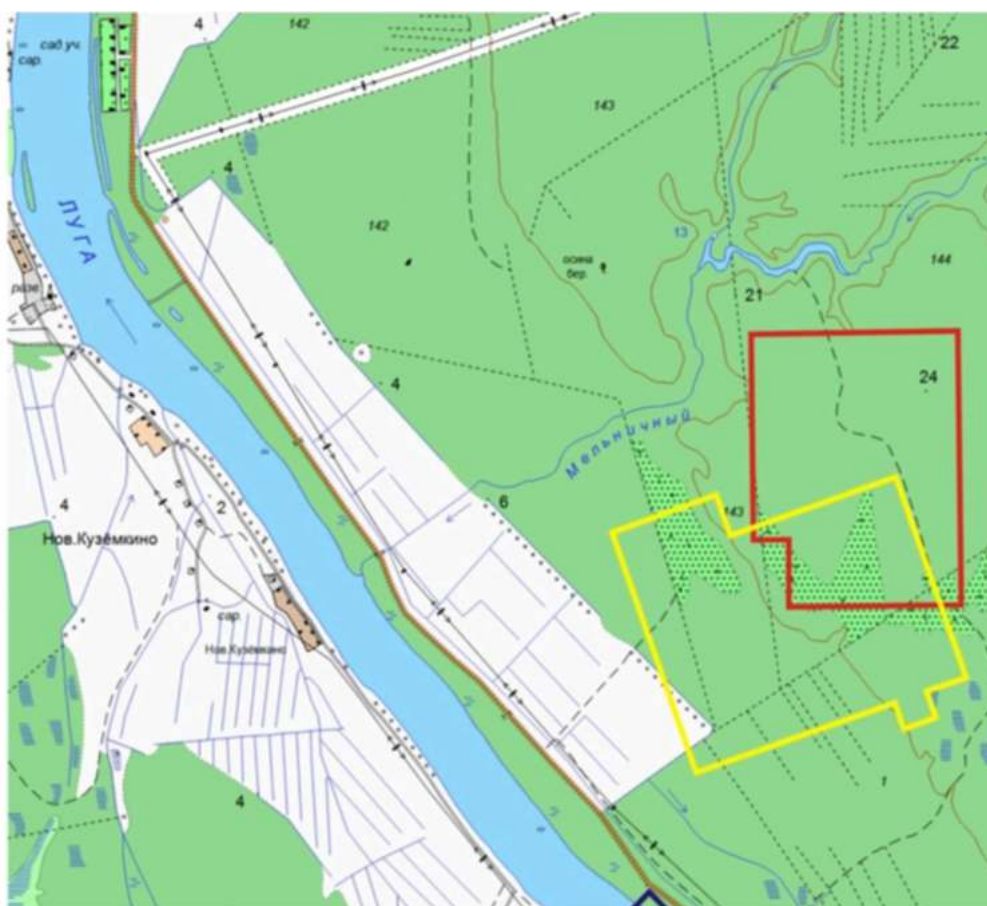


Рисунок 4.1. – Схема расположения площадки проектируемого сооружения. Желтым цветом обозначены границы первоначального положения площадки работ, на которой были встречены газопроявления; красным – границы новой площадки в результате изменения проектных решений [73]

Решение о необходимости выполнения научно-исследовательских работ было принято организацией, выполнявшей проектирование данного объекта после того, как в ходе выполнения инженерно-геологических изысканий в 2017 г. в ряде скважин наблюдались выбросы газа и газо-грязевой смеси (Рисунок 4.2). Наличие газопроявлений привело к необходимости изменения проектных решений и переносу положения площадки проектируемого объекта в безопасное место (Рисунок 4.1).



Рисунок 4.2. – Выброс газо-грязевой смеси во время выполнения инженерно-геологических изысканий

Научно-исследовательские работы на площадке проектируемого сооружения были выполнены в период январь – июль 2018 г. За это время были выполнены 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 и геофизическим изысканиям, и отчетов по лабораторным работам по изучению компонентного и изотопного состава газа.

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

##### **4.1.1 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 представляет 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.

#### **4.1.2 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 его большую роль играли аккумулятивные и эрозионные процессы. Наибольшим развитием пользуются 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

Морские аккумулятивные равнины образуют широкую (до 15 км) полосу вдоль побережья Финского залива. Лишь по восточному побережью Лужской губы равнина сужается до нескольких сотен метров. Границы равнин обычно четко выделяются по береговым валам или абразионным уступам максимального уровня литориновой трансгрессии. Абсолютная высота этих береговых линий плавно увеличивается в северо-западном направлении от 6 до 15 метров. Наличие нескольких серий разновозрастных береговых линий придает равнинам характер террасированности. Поверхность равнин ровная или слегка волнистая. Абразионные уступы литоринового моря окружают почти сплошным кольцом Курголовское и Куровицкое плато. Средняя высота уступов составляет 4.0 м, крутизна – около 40°.

#### 4.1.3 Геологическое строение

Исследуемый район в региональном геолого-структурном плане относится к северо-западной части Русской плиты в зоне ее сочленения с южным склоном Балтийского кристаллического щита. Нижний структурный этаж представлен кристаллическим фундаментом, структуры которого принадлежат северной части Новгородского блока. Осадочный чехол, образующий верхний структурный этаж, относится к Балтийской моноклинали северо-западного крыла Московской синеклизы [80].

В геологическом строении изучаемой территории принимают участие породы кристаллического фундамента и осадочного чехла, в составе которых выделяются дочетвертичные и четвертичные отложения. Интервал исследования, расположенный в песчано-глинистых грунтах с локальными скоплениями газа, сложен породами 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* ( $gQ_{III}ms2$ ) 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)* ( $fQ_{II}ms3$ ) залегает 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 разнородными полимиктовыми с включениями гравия и мелкой гальки кристаллических пород (15%) и песчано-гравийным материалом различной степени окатанности.

*Гляциолимний (наледниковый)* ( $lgQ_{II}ms3$ ) залегает 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 слабоглинистого. Ленточная слоистость наиболее ярко проявлена в средней части разреза и обусловлена чередованием прослоев алевритовых и песчаных глин мощностью соответственно от 1 до 3 мм и от 5 до 7 мм. 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* ( $mQ_{III}mk$ ) пользуются широким развитием в пределах Предглинтовой низменности. Они представлены морскими фациями мгинской свиты (мариний). Осадки этого межледниковья являются маркирующими не только

на территории европейской, но и азиатской частей России. Термолюминесцентным методом в нескольких разрезах определен возраст отложений в пределах 130 – 110 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 морских моллюсков аркто-бореального комплекса, а для периода оптимума – теплолюбивых лузитанских видов и фораминифер [23].

*Мгинская свита (мариний) (mQ<sub>III</sub>tg)* приурочена к нижним частям доледниковых долин. Он залегает на разных глубинах с абсолютными отметками кровли минус 34.0 м. Мощность отложений 4 м. Они 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* ( $l, laQ_{III}ln$ ) 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 от 23 до 26 м в древних долинах. Образования представлены суглинками и глинами, песками мелкими и пылеватыми.

*Осташковский горизонт* ( $gQ_{III}$ ) представлен ледниковыми отложениями и отложениями балтийского ледникового озера.

*Ледниковые отложения* ( $gQ_{III}os_2$ ) 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, галки и валунов кристаллических пород. Грунты содержат в толще включения единичных валунов, размером от 0.2 до 0.8 м.

*Отложения Балтийского ледникового озера* ( $lg Q_{III}bl$ ) пользуются широким развитием в приглинтовой полосе, пониженной части Ордовикского плато и на возвышенных участках Предглинтовой низменности. Установленный, по абсолютной высоте, уровень залегания и наличие береговых образований позволяют разделить осадки 1 и 2 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* ( $Q_{IV}$ ), представлены биогенными ( $bQ_{IV}$ ) и техногенными ( $tQ_{IV}$ ) образованиями.

Биогенные отложения ( $bQ_{IV}$ ) 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* ( $tQ_{IV}$ ) представлены отвалами грунтов и насыпями автомобильных дорог.

#### 4.1.4 Инженерно-геологические условия

На исследуемом участке был выполнен большой объем бурения инженерно-геологических скважин, глубиной от 20 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.

Нижняя ступень участка исследования отличается более неоднородным строением. В пробуренных скважинах вскрыты суглинки с включениями органики, линзы песка, а также скопления гальки, дресвы и щебня. Песчаные прослои встречаются на различных интервалах разреза и имеют различную мощность. Выполненные ранее геофизические исследования по нескольким профилям, показали, позволили выделить в разрезе газонасыщенные песчано-глинистые линзы, для которых характерны относительно высокие значения удельных электрических сопротивлений и скоростей продольных волн ( $V_p$ ), понижение в несколько раз отношения  $V_s/V_p$  и линзовидная форма геофизических аномалий [82]. Скопления газа приурочены к песчаным интервалам разреза, перекрытым пластичными суглинками и глинами, которые являются крышкой для газа.

#### **4.2 Результаты инженерно-геофизических исследований**

В соответствии с методикой, описанной в главе 3, на участке исследования, был 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 расстояние 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 4.3.

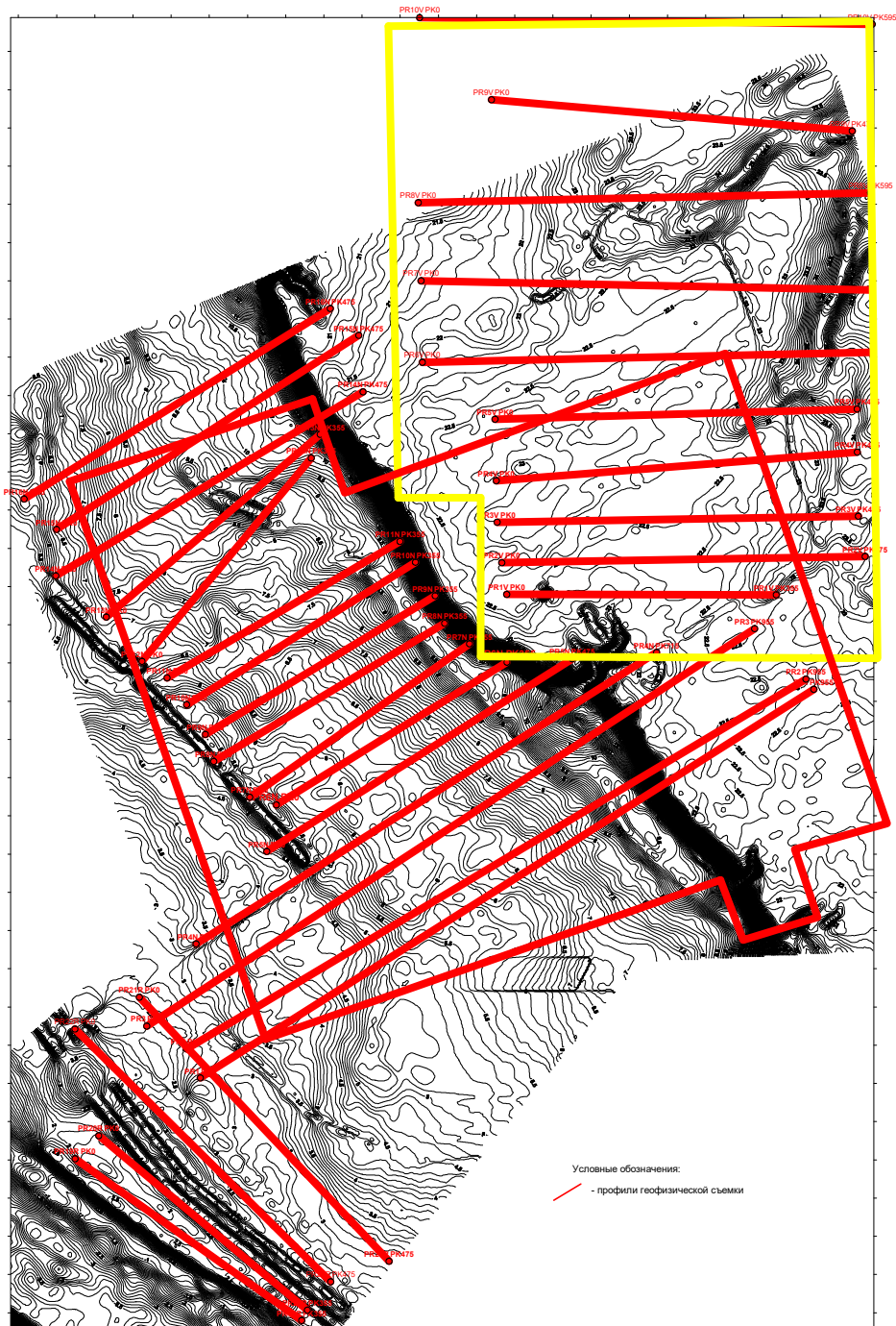


Рисунок 4.3. – Схема расположения профилей электроразведки

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, чем старая. Превышение составляет в среднем от 10 м до 16 м.

#### 4.2.1 Результаты электроразведочных работ

Результаты электроразведочных работ представлены в виде схемы расположения профилей ЭТ (Рисунок 4.3), геоэлектрических разрезов (Рисунок 4.4) и карты распределения удельного электрического сопротивления (Рисунок 4.5).

На рисунке 4.4 представлены интервалы геоэлектрических профилей, наиболее характерные для участка исследования.

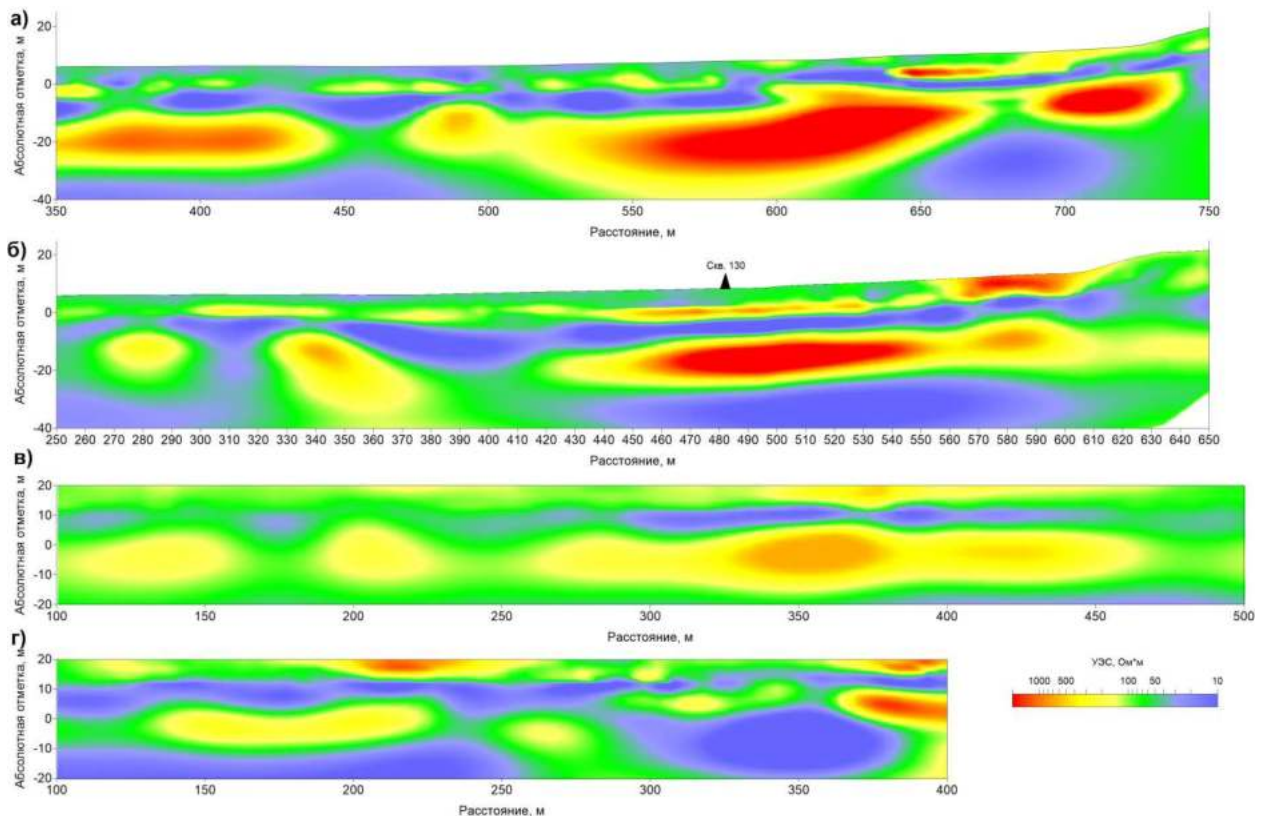


Рисунок 4.4. – Геоэлектрические разрезы по интервалам профилей ПР3н(а), ПР4н(б), ПР7в(в) и ПР3в(г)

Профили 3н и 7н выполнены в старых границах 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 4.4, 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 4.3), построенных по профилям ПР1н – ПР22н (старая площадка проектирования и участок перехода через р. Луга), зоны повышенных значений УЭС выделяются на большей части профилей. На ПР4н, расположена скважина 130, пробуренная в ходе выполнения инженерно-геологических изысканий 2017 г. Скважиной 130 была вскрыта газонасыщенная зона, выход газа из которой продолжался более года. Положение скважины совпадает с положением зоны аномально высоких значений УЭС (более 500 Ом·м) в интервале ПК450 – ПК550 профиля 4н (рисунок 4.4).

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 4.4в, 4.4г). Эти аномалии в целом 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 30-35 м. Анализ результатов инженерно-геологических работ показывает, что в целом 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 были построены карты распределения удельного электрического сопротивления в плане для разных глубин. На Рисунке 4.5 приведена карта, характеризующая распределение УЭС в плане для глубины, соответствующей абсолютной отметке 20 м. Эта карта позволяет наглядно оценить

распределение высокоомных аномалий по площади. На карте видно 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.

На интервалах профилей, где расположены наиболее контрастные аномалии УЭС были выполнены сейморазведочные работы. Большая часть сейморазведочных работ была выполнена в старых границах проектирования, на участке в новых границах сейморазведочные работы выполнены на интервалах отдельных профилей, где наблюдаются повышенные значения УЭС относительно вмещающих пород.

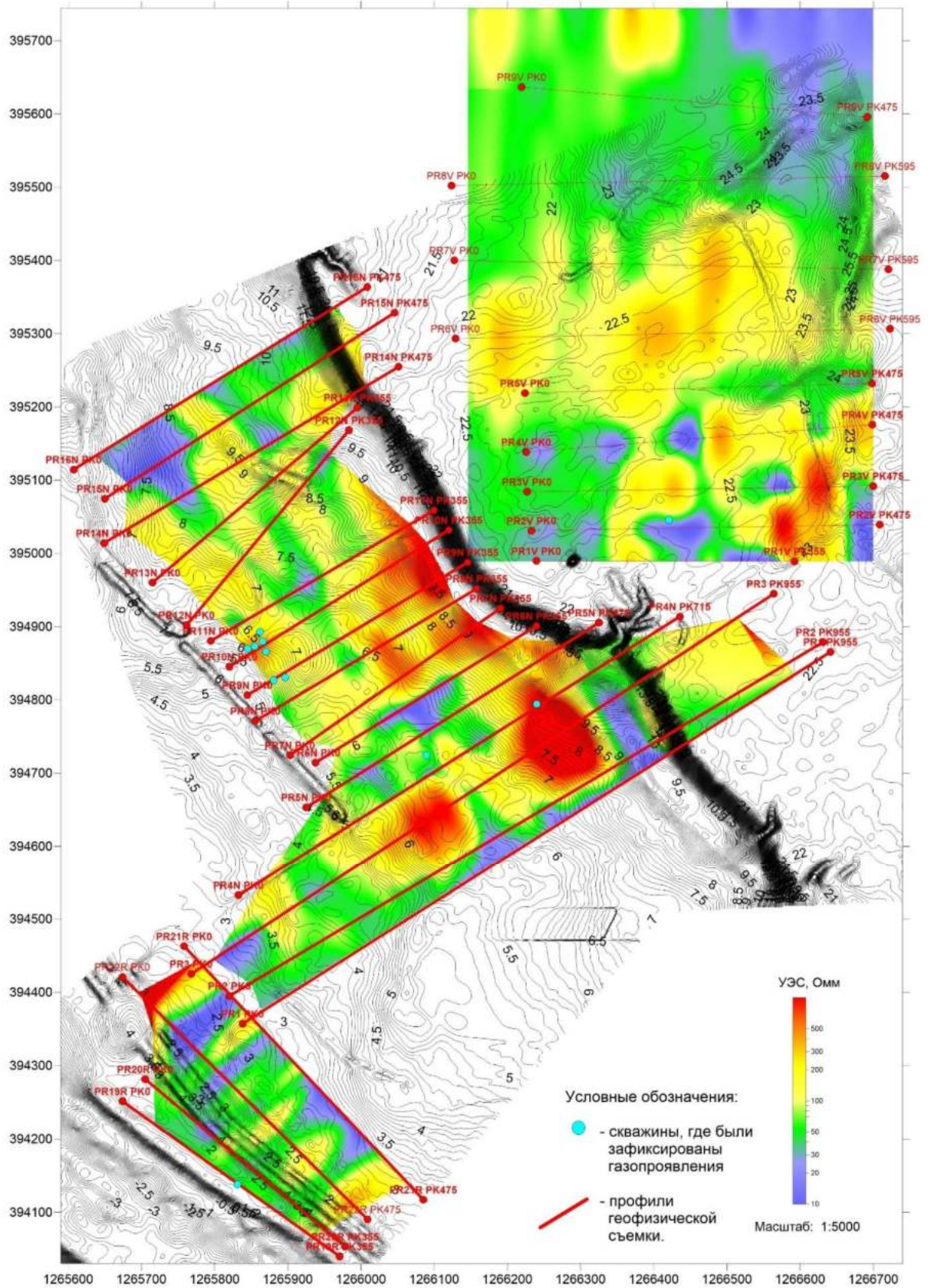


Рисунок 4.5 – Карта распределения УЭС по площади, построенная для глубины геоэлектрического разреза, соответствующего абсолютной отметке -20 м

#### 4.2.2 Результаты выполнения полевых сейсморазведочных работ

Основной задачей сейсморазведочных работ было 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, на которых были выделены участки с высокоомными аномалиями, которые могут быть связаны с газонасыщенными песками.

Примеры результата сейсморазведочных работ приведены на Рисунке 4.6 в виде интервалов сейсмотомографических разрезов. Для построения разрезов были использованы данные, полученные при регистрации поперечных волн, так как наблюдается большая дифференциация разреза по скоростям  $V_s$ . Также использование поперечных волн обеспечивает большую глубинность изучения разреза, поскольку высокий уровень грунтовых вод формирует очень контрастную преломляющую границу и нижележащие слои слабо дифференцируются на продольных волнах. Разрезы получены в результате двумерной кинематической инверсии сейсмических данных по профилям, расположенным в старых - 7н, 8н, 9н и новых 12в, 13в, 14в, и 16в границах проектирования.

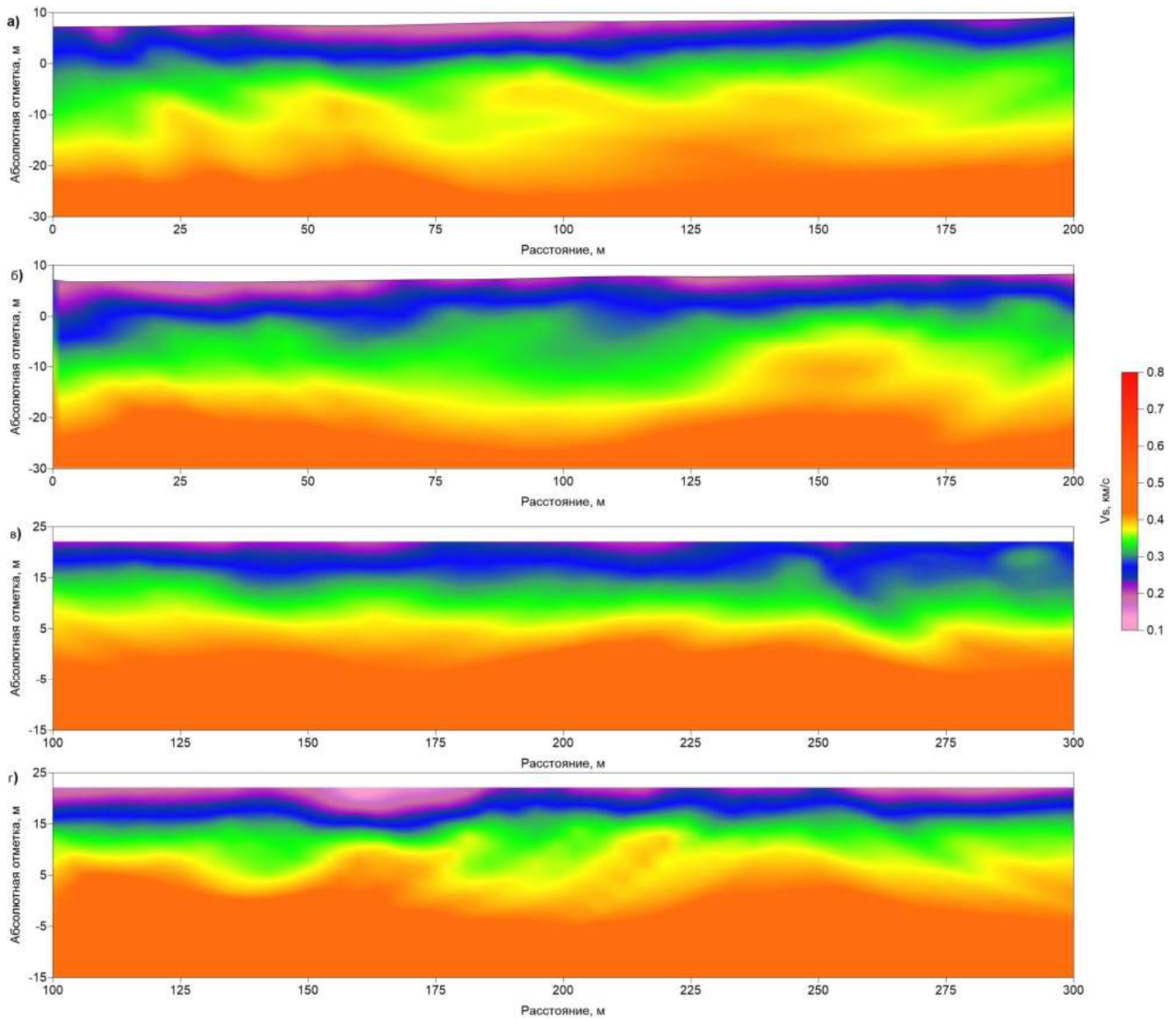


Рисунок 4.6. – Сейсмотомографические разрезы по интервалам профилей ПР3н(а), ПР4н(б), ПР7в(в) и ПР3в(г)

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 достаточно неоднороден по распределению скоростей поперечных волн от 300 до 400 м/с.

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

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

В соответствии с методикой, предложенной в Главе 3, 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 рассмотрим интервал профиля 3, на котором по данным ЭТ была выделена высокоомная аномалия в районе ПК375 – ПК450. На интервале профиля 3н ПК340 – ПК520 были выполнены сейсморазведочные работы, проведена обработка данных сейсморазведки методом сейсмотомографии и амплитудной томографии и совместная интерпретация данных электроразведки и сейсморазведки. (Рисунок 4.7).

Как видно на рисунке 4.7, 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 267, вскрывшая газонасыщенные пески.

Геофизические исследования, выполненные в новых границах проектируемого объекта, не выявили этой на 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.

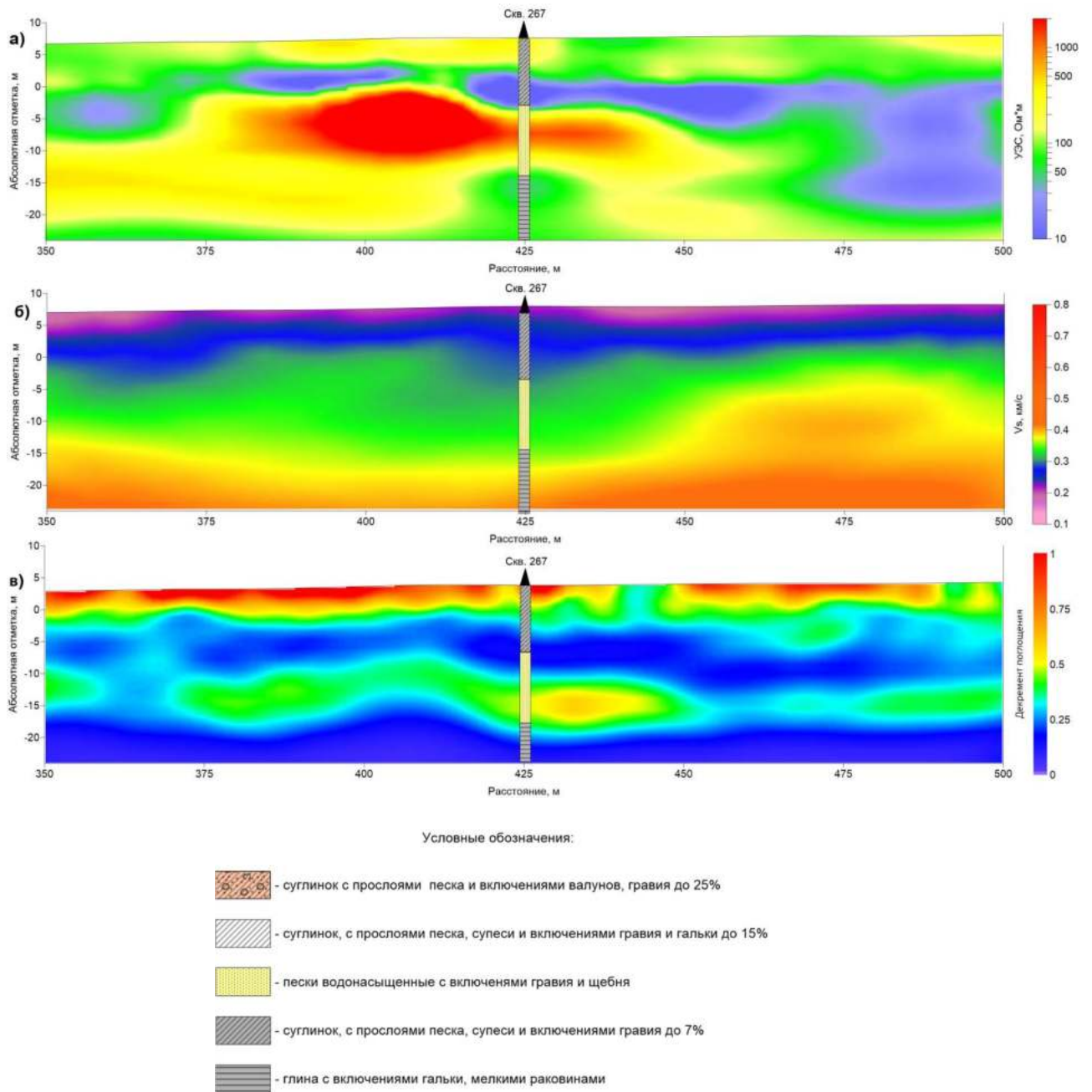


Рисунок 4.7 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по интервалу профиля ПРЗн

На этом же интервале были выполнены сейсморазведочные работы и выполнена обработка и совместная интерпретация данных, результат которой приведен на рисунке 4.8.

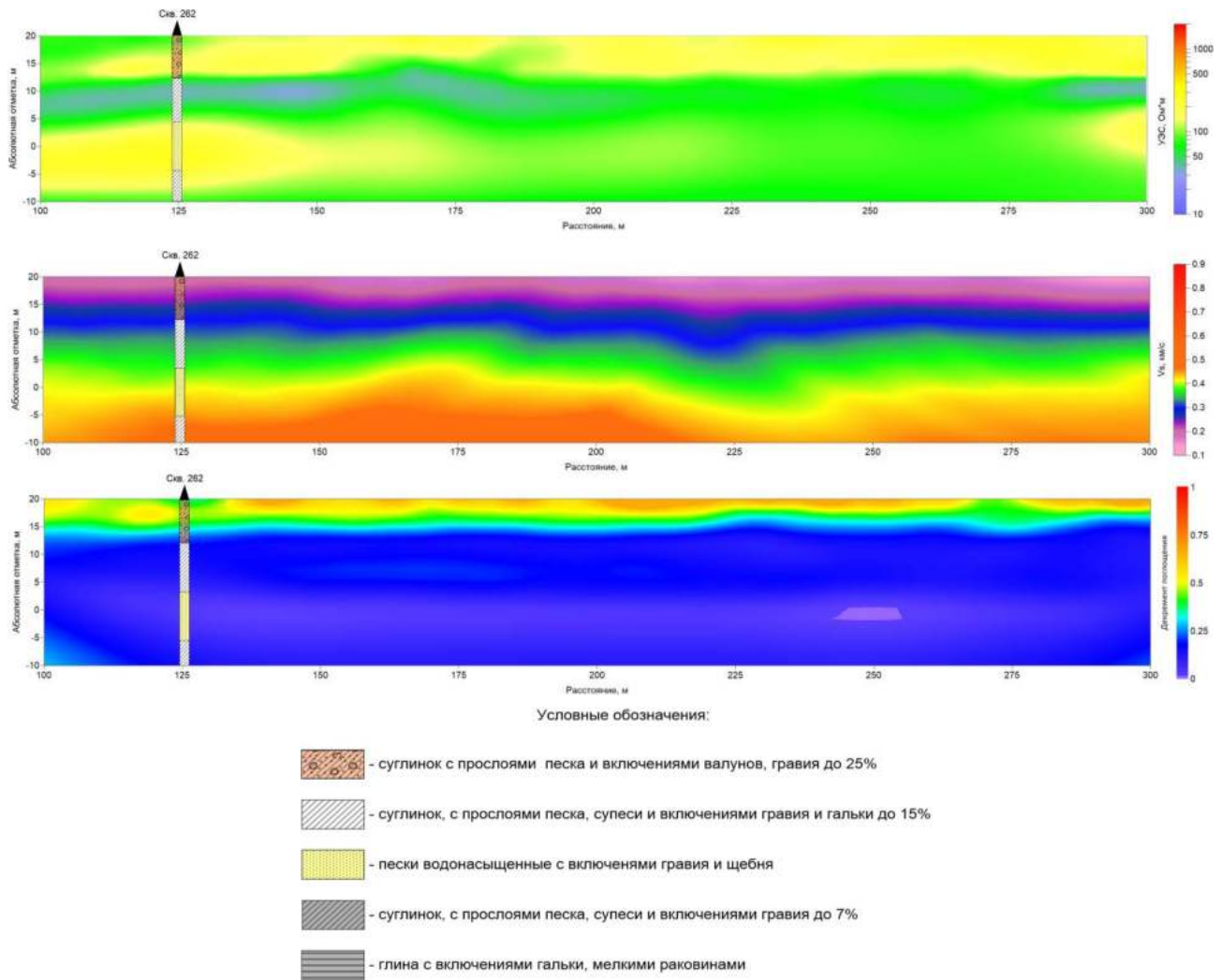


Рисунок 4.8 – Результат совместной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по интервалу профиля ПР6в

Как видно на рисунке 4.8, 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 и по всему интервалу профиля. Пробуренная в ходе выполнения инженерных изысканий скважина 262, показала наличие прослоя водонасыщенных песков и супесей в интервале ПК100 – ПК150, газопроявления зафиксированы не были.

### 4.3 Выводы по главе 4

1. Сопоставление результатов сейсмотомографических исследований и данных электротомографии с результатами инженерно-геологических изысканий показывает, что приповерхностные скопления газа, характеризуются аномально высокими значениями УЭС, отсутствием изменений или незначительными изменениями скоростей поперечных волн и значительным увеличением декремента поглощения. Такое сочетание признаков-индикаторов может свидетельствовать о наличии в разрезе линз газонасыщенных песков.
2. Все три признака-индикатора должны наблюдаться одновременно, в ином случае выделенные локальные аномалии повышенных значений УЭС вероятнее всего со скоплением гравелистых грунтов и крупнообломочного материала.
3. Применение амплитудной томографии и оценка распределения декремента поглощения в разрезе является необходимым условием при выполнении совместной интерпретации данных электроразведочных и сейсморазведочных работ для выявления локальных зон, возможно являющиеся ловушками для накопления газа. Включение в процесс обработки и интерпретации данных сейсморазведки амплитудной сейсмической томографии и анализа распределения декремента поглощения в разрезе позволяет значительно повысить качество интерпретации геофизических материалов и точность определения целевых объектов при изучении процессов газопроявлений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

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

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

## СПИСОК 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
$V_s/V_p$	Отношение скорости поперечных волн к скорости продольных волн
$\omega$	Круговая частота колебаний
$\vartheta$	Декремент поглощения
$\alpha_{\Pi}$	Коэффициент поглощения
$\lambda$	Длина волны
$k_{\Pi}$	Коэффициент пористости
$G$	Коэффициент водонасыщения
$W$	Весовая влажность
$W_{об}$	Объёмная влажность

$\rho$	Удельное электрическое сопротивлений
$C_{\text{орг}}$	Содержание органического углерода в грунте
$\sigma_{\text{сж}}$	Модуль всестороннего сжатия
$C$	Сцепление
$\varphi$	Угол внутреннего трения

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авербух А.Г., Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке / Недра, Москва, 1982 г., 232 стр., УДК: 550.834.017
2. Александрова Н. А., Ауслендер В. Г., Буслевич А. Л., Бондаренко Е. Д. 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. – М., 1993. 208 с
3. Александрова, О.Ю. Природные и природно-техногенные геологические процессы в подземном пространстве Санкт-Петербурга: закономерности развития, систематизация и возможности предотвращения: Автореферат дис. ... канд. геол.-минералогич. 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., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В.А. Электротомография: Аппаратура, методика и опыт применения., УДК 550.837.31, <https://nemfis.ru> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nemfis.ru>. – Дата доступа: 28.08.2020.
8. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. / Физика Земли 1995 - N 12 - с.79-90.

9. Богословский В.А. Опыт применения метода сопротивлений при создании противofильтрационных 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., Длугач А.Г., Костин Д.А., Рокос С.И., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря / Геология и геофизика, Том 43, №7, 2002, с. 587-598
14. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования / Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 4. – С. 30 – 43
15. Бурлуцкий Станислав Борисович. 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

18. Вознесенский Е. А., Кушнарера Е. С., Фуникова В. В. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах. — ФЛИНТА, Наука - Москва, 2013. — 104 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. Изд-во «Недра», 1968 г., стр. 226.
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, 383,[1] ил. 22 см, 2-е изд., перераб. и доп. М. Высш. шк. 1985
  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. Комплексование геофизических методов: учеб. Пособие /А.С. Долгаль; Перм. гос. нац.исслед. ун-т. - Пермь, 2012. - 167 с.
  40. Ефимова Н.Н. Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: 1999. – 16 с.
  41. Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных. - М.: Недра, 2005.-387с
  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. Колубакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков, А.Г., Рыбалко А.Е., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых / Инженерные изыскания. 2016. № 10 - 11. С. 38-51.
  45. Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986, 176 с.
  46. Королёв В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы. — М.: Издательство "КДУ", 2016. - 292 с.
  47. Кудрявцев Ю.И. Теория поля и ее применение в геофизике. Л.: Недра, 1988. 33.5 с.

48. Кузнецов О.Л., Дыбленко В.П., Курьянов Ю.А., Рогоцкий Г.В., Чиркин И.А. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Том 2: Экспериментальные исследования М.: Государственный научный центр Российской Федерации - ВНИИГеосистем, 2004. - 320 с.
49. Корнеев О.Ю., Свечников А.И., Рыбалко А.Е., Никитин М.А., Назарова О.В. Выявление геологических опасностей с помощью высокочастотного сейсмоакустического профилирования и локации бокового обзора для целей ГМГС/ Разведка и охрана недр, № 10, с. 48-53 (2011)
50. Куликова Н.В., Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Куликов А.И., Татарский А.Ю. «Комплексные геофизические исследования газонасыщенных песчаных отложений на территории Ленинградской области» 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., Глазунов В.В., Городнова Е. В., Ефимова Н.Н., Куликов А.И., Татарский А.Ю. Геофизический мониторинг изменений состояния грунтового основания автомобильной дороги при стабилизации грунтов с использованием энергии взрыва; 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. Специальная инженерная геология. Л.: Недра, 1978. 496 с.32.
55. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Микробиологические процессы в грунтовых плотинах/ 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., Севостьянов В.В., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А. Особенности изучения деформационно-прочностных свойств дисперсных грунтов сейсмоакустическими методами/Геозкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2016 №5, с.461-476
60. Никитин, В.Н. Основы инженерной сейсмоки / В.Н. Никитин. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 176 с.
61. Никитин, А.А. Комплексование 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., Сеницкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических

- исследований территории геологического новообразования "Ямальский кратер" / 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. Тырина Т.С. Влияние плотностных свойств глинистых грунтов на скорости распространения упругих волн /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 стр., УДК: 550.83:0.83
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. – М.: Недр, - 135с.: ил.
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., Тарасов Г.А. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря / 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., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Алешин М.И., Беляев П.Ю.; Савельева Л.А., Кузнецов В.Ю. Использование сейсмоакустических методов при изучении крупных озер для решения стратиграфических, палеогеографических и геоэкологических задач. Озера Евразии: проблемы и пути их решения / 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. Москва, 2009г.
80. Саммет Э.Ю., Шмаенок А.И. Объяснительная записка [Текст] / Государственная геологическая карта СССР Масштаб 1:200000. Серия Ильменская. Лист О-35-V. - М., 1980.
81. Скибина Л.Б., Бланкфельд К.С., Колянова И.Б., Яновский А.С., Баскова И.В., Иванская Т.Б., Задорожная Ф.В. Объяснительная записка [Текст] / Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Ильменская. Лист О-35-V (Кингисепп). - СПб, 2001.
82. Скобелев А.Д., Матлахова Е.Ю., Серебряков В.С., Ермаков А.П., Модин И.Н., Богданов М.И. Инженерно-геофизические исследования приповерхностных газопроявлений в песчано-глинистых грунтах / 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 стр.

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., Макарова Н.В., Макаров В.И. Четвертичная геология. 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, Wensaas L, Løseth H, Hermanrud C., 2007 Seismic modeling of gas chimneys / Geophysics, vol. 72 (pg. SM251-SM259)
94. Anderson, A. L., & Hampton, L. D. (1980). Acoustics of gas-bearing sediments I. Background / The Journal of the Acoustical Society of America, 67(6), 1865–1889. doi:10.1121/1.384453
95. Anderson, A. L., Hampton, L. D. Acoustics of gas-bearing sediments. II. Measurements and models / The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67(6), 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., Rosqvist, H., Leroux, V., Svensson, M., Lindsjö, M., Månsson, C-H., Johansson, S. / Potential of Geoelectrical Imaging Techniques for Detecting Subsurface Gas Migration in Landfills: An Experiment / Paper presented at Procs. 14th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, Krakow, Poland, 2008.
98. Dahlin T., V. Leroux, H. Rosqvist, M. Svensson, M. Lindsjö, C.H. Månsson S.Johansson / Geoelectrical Resistivity Monitoring for Localizing Gas at Landfills, Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Dublin, Ireland, 7 - 9 September 2009
99. Dehua Han, A. Nur, and Dale Morgani Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones / *Geophysics*, vol. 51. no. II (November 1986); p. 2093-2107. 13 figs., 2 tables.
100. Hilterman, F. J. (1975). Amplitudes of Seismic Waves—A Quick Look, *Geophysics* 40, 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 Ahmad, Douglas Schmitt, Reservoir Characteristics of a Quaternary Channel: Incorporating Rock Physics in Seismic and DC Resistivity Surveys, Datapages/Search and Discovery Article #90211 CSPG 2015
103. Lin C. M., Gu L. X., Li G. Y., Zhao Y. Y., & Jiang W. S. (2004). Geology and formation mechanism of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China. *AAPG Bulletin*, 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., & Lin, C.-M. (2010). Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China. *AAPG Bulletin*, 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.umd.edu/geosciences/faculty/sheriff/495-subsurface%20imaging%20in%20archaeology/Sources/Loke\\_elect\\_tutorial.pdf](http://www.hs.umd.edu/geosciences/faculty/sheriff/495-subsurface%20imaging%20in%20archaeology/Sources/Loke_elect_tutorial.pdf), свободный.
109. Matsushima J., 2006, 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.*, 111
110. Nakai N. Geochemical studies on the formation of natural gases. – «*J. Earth. Sci. Nagaya Univ.*», 1961, vol. 9, 59-61.
111. Nikrouz R., 2016, Relationship between head wave amplitudes and seismic refraction velocities to detect lateral variation in the refractor / *Journal of the Earth and Space Physics*, 4, 69-76.
112. Palmer D., 2001, Resolving refractor ambiguities with amplitudes, *Geophysics*, 66, 1590-1593.
113. Salas-Romero, S., Malehmir, A., Snowball, I. et al. Identifying landslide preconditions in Swedish quick clays - insights from integration of surface geophysical, core sample- and downhole property measurements. *Landslides* 13, 905–923 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0633-y>
114. Satoshi Maekawa and Thomas J. Fenner: Study of Cavity Depth Estimation Behind Concrete Tunnel Lining Using GPR, Fifth International Conference on Ground Radar, Kitchener, Canada, 1994.
115. Schön J.H. [2015] *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Elsevier, Amsterdam.
116. Yang Hui, Zhang Youyan, Ma Dade, Wen Baihong, Yu Shiyong, Xu Ziyuan, Qi Xiaoping Integrated geophysical studies on the distribution of Quaternary biogenic gases in the Qaidam Basin, NW China, *Petroleum exploration and development*,

Volume 39, Issue 1, February 2012, Online English edition of the Chinese language journal

117. Xia Zhang, Chun-Ming /Characteristics and accumulation model of the late Quaternary shallow biogenic gas in the modern Changjiang delta area, eastern China  
Published online: 19 April 2017 Pet. Sci. (2017) 14:261–275 DOI 10.1007/s12182-017-0157-2