

УДК 550.8.05

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕРАСПРОСТРАНЁННЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ОСНОВЕ ПЕРЕОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИНЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

**А.В. Яблоков¹, А.В. Мамаева², А.Т. Семашев², В.Д. Гришко², А.А. Козяев², В.В. Лукьянов³,
Е.А. Буряк⁴**

¹ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. академика Коптюга, д. 3, Россия*

² *ООО «РН-Геология Исследования Разработка», 660098, г. Красноярск, ул. 9 мая, д. 65Д, Россия*

³ *ООО «РН-Проектирование Добыча», 660020, г. Красноярск, ул. Петра Подзолкова, 3К, Россия*

⁴ *ООО «Харампурнефтегаз», 629830, г. Губкинский, территория Панель 1, ст. 3, Россия*

Предложен подход к оценке распределения общераспространённых полезных ископаемых в верхней части геологического разреза на основе переобработки и интерпретации архивных данных 3D-сейсморазведки. Подход включает восстановление скоростных моделей продольных и поперечных волн с использованием модифицированных методов преломлённых и поверхностных волн, автоматизированное извлечение дисперсионных кривых с применением нейросетевого алгоритма, а также расчёт и интеграцию набора сейсмических и морфометрических атрибутов. На основе совокупности признаков выполняется кластеризация, позволяющая выделять фации, ассоциированные с отложениями различного генезиса. Подход апробирован на территории Харампурского лицензионного участка, расположенного в арктической зоне Западной Сибири и характеризующегося распространением многолетнемерзлых пород. На примере этого участка (площадью ~60 км²) показано, что предложенный подход обеспечивает построение детализированных прогнозных карт, согласующихся с данными бурения и действующими карьерами. Кластеризация по совокупности сейсмических и ландшафтных признаков позволила выделить фации и сформировать физико-геологические модели песков и торфа с промышленно значимыми мощностями. Такой подход обеспечивает получение детализированных прогнозных карт без дополнительных полевых работ с разрешением, сопоставимым с инженерным бурением.

Ключевые слова: сейсморазведка, метод преломленных волн, многоканальный анализ поверхностных волн, кластерный анализ, верхняя часть геологического разреза, общераспространённые полезные ископаемые.

PREDICTIVE MAPPING OF INDUSTRIAL MINERALS USING REPROCESSING DATA BY NEAR-SURFACE SEISMIC METHODS

**A.V. Yablokov¹, A.V. Mamaeva², A.T. Semashev², V.D. Grishko², A.A. Kozyaev², V.V. Lukyanov³,
E.A. Buryak⁴**

¹ *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Academician Koptuyg Ave., 3, Russia*

² *LLC «RN-Geology Research Development», 660098, Krasnoyarsk, 9 May St., Building 65D, Russia*

³ *LLC «RN-Upstream Design», 660020, Krasnoyarsk, st. Petra Podzolkova, 3K, Russia*

⁴ *LLC «Kharampurneftegaz», 629830, Gubkinsky, Area Panel 1, Building 3, Russia*

An approach is proposed for assessing the distribution of industrial minerals in the upper part of the geological section based on reprocessing and interpretation of archived 3D seismic data. The approach includes reconstruction of P- and S-wave velocity models using modified refraction and surface wave methods, automated extraction of dispersion curves using a neural network algorithm, as well as calculation and integration of a set of seismic and morphometric attributes. Based on the combined feature space, clustering is performed to delineate facies associated with deposits of different genesis. The approach was tested on the Kharampur license area located in the Arctic zone of West Siberia, characterized by the

presence of permafrost. For this site (area ~60 km²), it is shown that the proposed workflow enables the construction of detailed predictive maps consistent with drilling data and active quarries. Clustering based on combined seismic and terrain-related features allowed identification of facies and the construction of physico-geological models of sand and peat bodies with economically significant thicknesses. This approach enables the generation of high-resolution predictive maps without additional field surveys, with a resolution comparable to engineering-scale drilling data.

Keywords: *seismic exploration, refracted wave method, multichannel analysis of surface waves, cluster analysis, near-surface geological section, industrial minerals*

ВВЕДЕНИЕ

Освоение крупномасштабных нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) в Западной Сибири и Арктике неизбежно связано с длительными программами инфраструктурного строительства, включающими создание транспортных коридоров, линейных объектов и площадочных сооружений [Хрусталева, 2005; Попов и др., 2010]. При этом ключевую роль в себестоимости таких проектов начинают играть местные строительные материалы: пески, глины, песчано-гравийные смеси и торф, которые относятся к категории общераспространённых полезных ископаемых (ОПИ). Для крупных объектов в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) объём только песчаного сырья может превышать 1 млн м³, а расстояние от действующих карьеров до площадок строительства нередко достигает 100-300 км, что существенно увеличивает долю транспортной составляющей в общих затратах и усиливает экологические ограничения на развитие территории [Заключение государственной экологической экспертизы..., 2013; Государственная программа Ямало-Ненецкого ..., 2013 г.].

Классические схемы инженерно-геологических изысканий, ориентированные на плотные сети шнековых и колонковых скважин в сочетании с георадарной съёмкой и электротомографией, в условиях криолитозоны оказываются ресурсозатратными и малооперативными. Сезонный характер работ, сложность доступа к заболоченным участкам, необходимость отдельной мобилизации геофизических партий и ограниченная экстраполируемость точечных буровых данных приводят к тому, что стоимость и длительность поисков локальных залежей ОПИ становятся сопоставимыми с затратами на последующее обустройство карьеров [Миронова, 2021]. В то же время на значительной части лицензионных участков (ЛУ) к моменту перехода к детальным инженерным изысканиям уже накоплен обширный массив данных сейсморазведочных работ 3D (СРР), полученных в рамках глубоких структурно-геологических исследований методом отражённых волн. В стандартной практике эти материалы рассматриваются прежде всего, как инструмент построения моделей осадочного чехла и прогноза ловушек углеводородов, тогда как верхняя часть геологического разреза (ВЧР) мощностью порядка 30-100 м остаётся побочным, практически не востребованным с инженерной точки зрения продуктом обработки [Козырев и др., 2014]. Между тем именно в этом интервале сосредоточены рыхлые отложения, определяющие условия размещения и эксплуатации карьеров ОПИ.

Настоящее исследование направлено на то, чтобы использовать архивные данные СРР как материальную основу поиска локальных источников строительного сырья и оптимизации схемы размещения карьеров. В центре предлагаемой технологии находится специализированная переобработка полевых записей с использованием модифицированных вариантов метода преломлённых волн (МПВ) и многоканального анализа поверхностных волн (MASW) для восстановления трёхмерных распределений скоростей продольной (V_p) и поперечной (V_s) волн в ВЧР. Эти скоростные модели дополняются системой диагностических атрибутов качества сейсмического материала и морфометрическими характеристиками рельефа и далее совместно анализируются с данными микросейсмокаротажа (МСК), результатами бурения и материалами дистанционного

зондирования для построения реалистичных физико-геологических моделей (ФГМ). Задача зонирования территории по перспективности залегания ОПИ решается в рамках кластеризации по совокупности сейсмических и ландшафтных признаков, что позволяет объективно выделять фации с промышленно значимой мощностью песчаных и торфяных толщ без проведения дополнительных полевых работ и за счёт этого уменьшать сроки и стоимость инженерно-геологических изысканий.

Каждый из используемых методов обеспечивает дополнительную информацию о свойствах грунтов. Метод МПВ позволяет восстановить пространственное распределение V_p в ВЧР за счёт анализа годографов первых вступлений и обеспечить основное представление о модели ВЧР на начальном этапе интерпретации. Модифицированный метод MASW ориентирован на анализ данных поверхностных волн и построение 3D-модели V_s , которые, как и V_p обладают значительной чувствительностью к литологическим изменениям и механическим свойствам грунтов и могут быть сопоставлены с типами отложений ОПИ, выделенными в процессе бурения. Применение сочетания методов МПВ и MASW обеспечивает более детальное изучение ВЧР, т.к. значительные участки исследования приурочены к зонам распространения мерзлых и талых пород, для которых значения V_p и V_s существенно различаются [Горяинов, 1992]. Кроме того, дополнительная связь между скоростными параметрами и литологическим составом пород повышает надёжность дальнейшей интерпретации, в особенности в условиях, где водонасыщение может существенно влиять на инженерно-геологические характеристики отложений [Wang et al., 2020; Дергач и др., 2024].

Основной вызов при обработке больших объёмов данных СРР инженерным методом MASW заключается в корректном переходе от 2D к 3D и реализации автоматического устойчивого способа извлечения дисперсионных кривых поверхностных волн из спектральных изображений. Традиционные подходы, основанные на поиске максимумов амплитуд или эвристических методах кластеризации, демонстрируют ограниченную устойчивость к шумам, артефактам спектрального преобразования и загрязнению спектров побочными модами поверхностных волн [Wang et al., 2021]. Внедрение нейросетевого подхода представляет собой качественный скачок в решении этой проблемы. В работе применена предобученная сверточная нейронная сеть архитектуры автоэнкодер (АЕ) для бинарной сегментации спектральных изображений, позволяющая отделить целевой сигнал фундаментальной моды от фонового шума и артефактов [Яблоков и др., 2025]. Нейросетевой подход извлечения дисперсионных кривых закономерно комбинируется с современными продвинутыми алгоритмами помехоустойчивого спектрального анализа и инверсии локальной минимизацией, что обеспечивает получение физически обоснованных скоростных моделей.

Применение методов машинного обучения включает также кластерный анализ на основе k -средних для выделения фаций по наборам признаков (V_p , V_s , V_p/V_s , вес высоких частот в спектре, морфометрия рельефа, максимальные ошибки первого рефрактора), что обеспечивает объективную классификацию геологических типов отложений без субъективных предположений интерпретатора. Выбор кластеризации без обучения обусловлен необходимостью создания универсальной технологии, применимой на любых площадях 3D-сейсморазведки и в условиях отсутствия данных МСК и описания литологии.

В данной работе рассматривается пример пилотного исследования на участке СП 61/08-09 Харампурского НГКМ в ЯНАО. Полученные результаты позволили выделить три типа залежей ОПИ (пески камовых холмов, аллювиальные пески, торф грядово-мочажинных болот), построить прогнозную карту и рекомендовать два участка под карьеры песка мощностью 6-16 м в радиусе ≤ 5 км от существующих кустовых площадок. Полученные результаты относятся к условиям криолитозоны с развитой четвертичной толщей и наличием контрастных литологических различий (пески – суглинки – торф). Перенос технологии на другие регионы требует дополнительной адаптации параметров обработки и верификации на независимых данных. Успешное тиражирование предложенной технологии позволит снизить стоимость инженерно-геологических изысканий путем сокращения объёмов традиционного бурения без потери требуемой точности оценки мощности и

распределения полезной толщи, а также сократить сроки выявления и разведки ОПИ для размещения карьеров до нескольких недель, что критично для проектирования объектов инфраструктуры в условиях сжатых сроков.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Харампурский ЛУ расположен на территории Пуровского и Красноселькупского районов в юго-восточной части ЯНАО (рис. 1). Большая часть ЛУ сложена тонкодисперсными глинистыми грунтами вскрыши, а промышленные скопления песков и ПГС ограничены отдельными геоморфологическими элементами (камовые холмы, пойменные террасы). На участке пилотных работ (СП 61/08-09 в юго-восточной части ЛУ) площадью ~60 км² известны три разведанных эталонных карьера: «Север» и «Т9» (пески камовых холмов мощностью 11–16 м), а также «Торф» (торф грядово-мочажинных болот мощностью до 5 м). В работе эти объекты использованы для калибровки сейсмофациальных моделей и верификации результатов. Территория ЛУ сильно заболочена, развитая гидросеть влияет на формирование аллювиальных песков и торфяников, а отепляющее влияние водотоков сказывается лишь на самых верхних горизонтах ММГ [Акт № 120-2017 государственной ..., 2017; Воронова и Гребенюк, 2018].

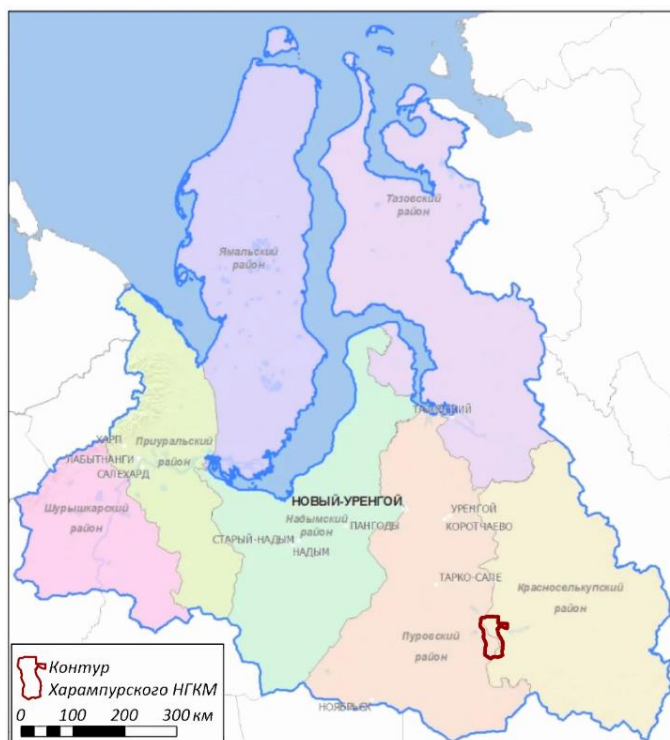


Рисунок 1. Административное расположение Харампурского НГКМ.

Почвенный покров и растительность. Почвенно-растительный покров отражает литологическую и геоморфологическую дифференциацию верхней части разреза и может рассматриваться как дополнительный индикатор при прогнозировании ОПИ. На территории распространены глеевато-таёжные, а также болотные (верховые и переходные) торфяные почвы [Акт № 120-2017 государственной ..., 2017; Воронова и Гребенюк, 2018]. Дренажные участки, приуроченные к песчаным отложениям (в том числе камовым холмам и элементам пойменных террас), характеризуются редколесьем северотаёжного типа. Напротив, пониженные и слабо дренажные формы рельефа заняты болотными комплексами с мощными торфяными залежами.

Рельеф местности. Территория представляет собой слаборасчленённую лесотундровую равнину озёрно-ледникового происхождения, осложнённую долинами рек и озёрно-болотными понижениями [Уфимцева, 2021]. Рельеф сформирован на четвертичных песчано-глинистых отложениях и характеризуется сочетанием дренированных возвышенных участков и обширных заболоченных пространств. Ключевыми геоморфологическими элементами, контролирующими распространение ОПИ, являются камовые холмы, аллювиальные формы пойм и террас, а также пониженные болотные участки. Камовые холмы сложены преимущественно песчаными отложениями и представляют наибольший интерес как объекты локализации строительных песков, тогда как пониженные элементы рельефа часто заняты торфяниками (рис. 2). Развитие многолетнемерзлых пород обуславливает формирование характерных криогенных форм (термокарстовые западины, бугры пучения, полигональные структуры), которые создают дополнительную морфологическую неоднородность и влияют на распределение физических свойств грунтов, в том числе скоростей упругих волн и атрибутов, используемых в дальнейшем анализе.

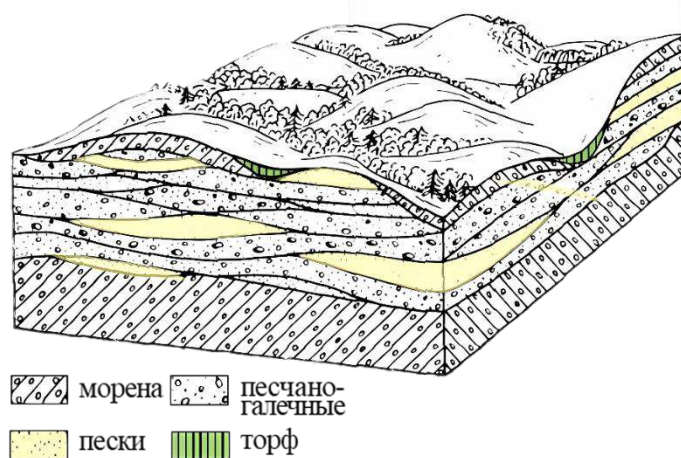


Рисунок 2. Современный холмисто-западинный рельеф. Камовые холмы [Ахромеев, 2002].

Геокриологическое строение. Участок расположен в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород [Лебедева и др., 2020]. Кровля мерзлоты залегает неравномерно: на заболоченных участках она опускается на глубины до нескольких метров, тогда как в пределах дренированных форм рельефа и песчаных тел может находиться ближе к поверхности. Мощность сезонно-талого слоя изменяется от 0,3–0,4 м в торфяниках до 2 м и более в маловлажных песках. По данным шнекового бурения скважин для МСК многолетнемерзлые грунты (ММГ) в пределах торфяников залегают ниже сезонно-талого слоя (СТС) и приурочены к положительным микроформам рельефа – буграм высотой до 5 м. На сильно заболоченных участках кровля ММГ залегает на глубине от нескольких метров до 3-6 м и глубже.

Эти особенности контролируют распределение скоростей упругих волн и влияют на сейсмические атрибуты данных. В частности, мерзлые грунты и плотные песчаные отложения, характеризуются повышенными скоростями, тогда как талые водонасыщенные и торфяные отложения – пониженными скоростями и ослаблением сигнала.

Геологическое строение. Верхняя часть разреза (ВЧР) характеризуется выраженной латеральной неоднородностью, обусловленной чередованием четвертичных отложений озёрно-ледникового, моренного, аллювиального и болотного генезиса преимущественно песчано-глинистого состава (рис. 3). Мощность ВЧР достигает ~80 м. Широко распространены торфяные отложения мощностью до 4–6 м, приуроченные к пониженным элементам рельефа.

Песчаные отложения, представляющие основной интерес как объекты ОПИ, локализуются неравномерно и связаны преимущественно с камовыми холмами, аллювиальными отложениями пойм и террас, а также отдельными гляциофлювиальными образованиями. Их мощность варьирует от первых метров до 10–15 м и более. Суглинистые и глинистые отложения распространены повсеместно и формируют основной объем разреза, особенно в пределах озёрно-ледниковых равнин и пойменных зон, где наблюдается увеличение их мощности. Подробное описание литологического состава отложений представлено в материалах государственной геологической карты 1000/3 листа Q-44 – Тазовский [Файбусович и Лебедева, 2020] и сопроводительной пояснительной записки [Лебедева и др., 2020].

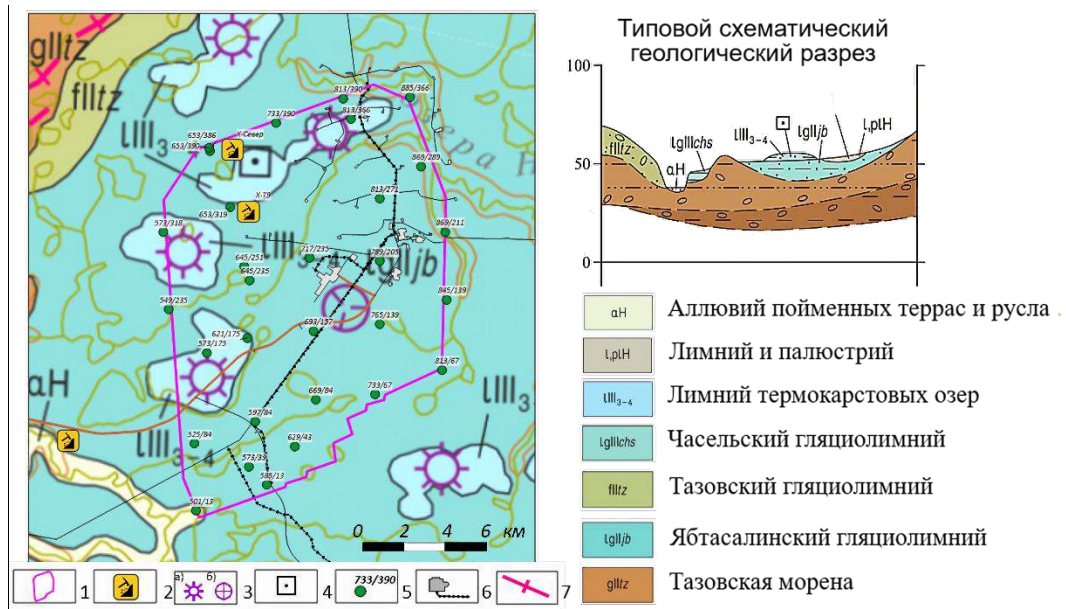


Рисунок 3. Обозначение контура работ, действующих карьеров и различных форм рельефа на фрагменте ГГК-1000/3 четвертичных образований, лист Q-44-Тазовский (слева). Типовой ожидаемый геологический разрез без привязки к координатам (справа).

Легенда: 1 – контур работ; 2 – карьеры ОПИ; 3 – а) инверсионные термокарстовые холмы, б) термокарстовые западины; 4 – проявления ОПИ; 5 – шнековое бурение для МСК (№ Рr/рр); 6 – инфраструктура; 7 – ледниковые параллельно-грядовые формы.

Геоморфологические типы ОПИ. На основе анализа геоморфологии и данных шнекового бурения выделены основные типы залегания песчаных и торфяных отложений:

1. Камовые холмы (лимногенные образования). Дренированные возвышенные формы рельефа, сложенные преимущественно песчаными отложениями. Часто перекрыты торфяными покровами различной мощности. Представляют основной тип локализации строительных песков.
2. Аллювиальные отложения пойм и террас. Приурочены к руслам и пойменным участкам рек. Представлены преимущественно песками различной крупности с примесью гравийно-галечного материала. Являются источником песчано-гравийных смесей.
3. Болотные (лимно-палюстриальные) образования. Имеют вытянутую форму и располагаются в направлении, перпендикулярном направлению стока поверхностных вод. Приурочены к пониженным и слабо дренированным элементам рельефа. Сложены торфяными и глинисто-илистыми отложениями и формируют залежи торфа.

Геоморфологические типы ОПИ на космоснимке (рис. 4) уверенно дифференцируются по морфологическим и спектральным признакам: песчаные тела, как правило, соответствуют более

светлым и дренированным участкам, тогда как заболоченные зоны и торфяники характеризуются тёмными тонами и полосчатой структурой, обусловленной грядово-мочажинным рельефом (рис. 4).

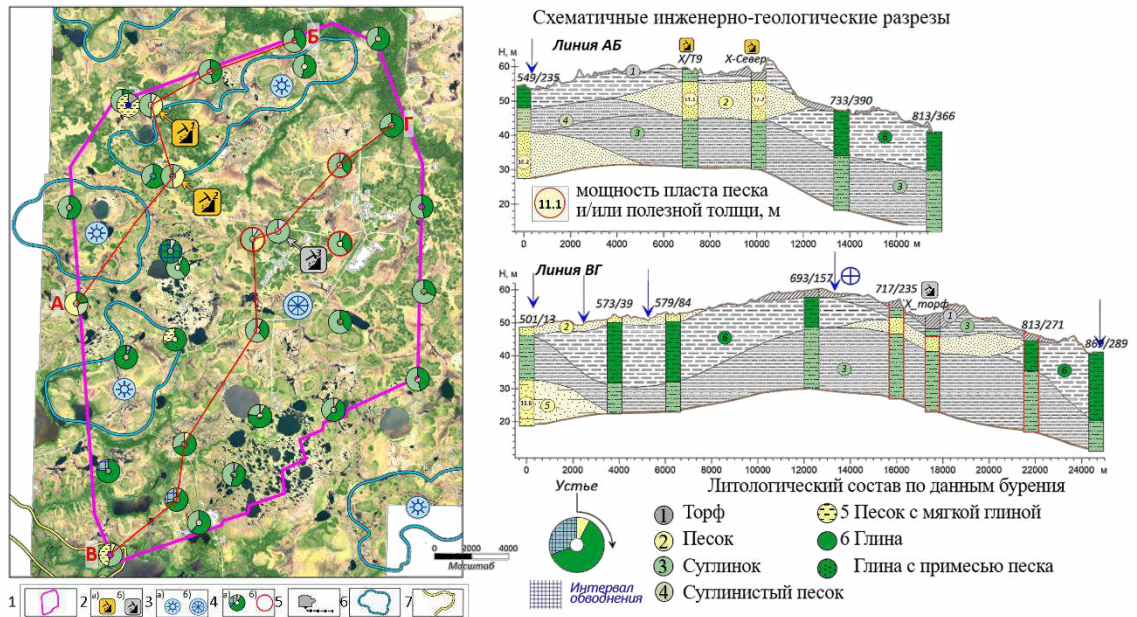


Рисунок 4. Геоморфологические типы ОПИ на космоснимке. Представленные справа 2D разрезы проходят по линиям АБ и ВГ, отмеченных на космоснимке слева.

Легенда: 1 – контур работ; 2 – карьеры ОПИ: а) пески, б) торф; 3 – термокарстовые элементы рельефа: а) инверсионные холмы, б) западины; 4 – скважины МСК: а) факт, б) модель; 5 – инфраструктура; 6 – отложения лимния (шПЗ-4) (внемасштаба); 7 – аллювий пойменных террас и русла (αН).

ИСПОЛЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Предложенный подход к восстановлению модели скоростей продольной волны в условиях ММГ. Скоростная модель V_p восстанавливается по данным МПВ после получения суммарных статических поправок с учетом остаточных. На первом этапе выполняется автоматическая редакция шумящих трасс и пикирование первых вступлений с контролем ошибок по двум рефракторам, что позволяет дополнительно выделить информативный атрибут ошибки пикировок, чувствительный к зонам ММП. Затем строятся двухслойная и томографическая модели рефрактора, сравниваются их статические поправки, и на основе томографической статики, с учётом остаточных поправок, восстанавливается эффективное вертикальное время в ВЧР, которое разлагается на длинно- и короткопериодную компоненты для расчёта скоростей V_p в интервалах 0-20 и 20-100 м.

Предварительная обработка сейсмограмм общего пункта возбуждения (ОПВ) включала процедуры присвоения геометрии и автоматической редакции шумных трасс. Пикирование первых вступлений выполнялось в ПО Flatirons и состояло из 5 итераций. На каждой итерации качество пикирования контролировалось по картам ошибок пикировки для каждого из двух предварительно прослеженных рефракторов. Благодаря выполненной редакции шумящих каналов, шумовая компонента на картах ошибки пикировки была минимальной и позволила снизить общую ошибку до величин 8 мс и 5 мс для первого и второго рефрактора, соответственно. Детальный анализ волнового поля первых вступлений в области максимальных величин ошибки первого рефрактора ($Fbpick_error$) показал, что этот атрибут маркирует зоны несимметричных обрывистых высокоскоростных участков годографов, соответствующих зонам наличия ММП и инверсии скоростей. На рис. 5а представлена типичная сейсмограмма из участка с малыми ошибками

пикировок первого рефрактора, на которой видны регулярные годографы с плавными латеральными вариациями, а на рис. 5б сейсмограмма с большими ошибками пикировок. В таких местах метод МПВ не может работать корректно, потому что рефрактор имеет резкие латеральные вариации, а преломленные волны от границ с инверсией скоростей не выходят на поверхность. Поскольку этот атрибут является хорошим индикатором наличия ММП в зоне малых скоростей, он был включен в список дополнительных атрибутов для последующего кластерного анализа. Следует отметить уникальность этого атрибута, т.к. аналогичных признаков в других атрибутах, указывающих на аномалии ММП не выявлено. Максимизация доминирующего влияния компоненты ММП на этот атрибут обеспечена автоматической редакцией трасс и итерационным процессом улучшения пикировок первых вступлений.

После пикирования первых вступлений были рассчитаны две модели: *двухслойная модель рефрактора и томографическая модель*. Скорости по обеим моделям существенно отличались от скоростей, полученных по данным МСК и вертикальным временам, что объясняется неоднозначностью послойной аппроксимации и ограничениями томографической модели МПВ в условиях инверсии скоростей.

В этой связи был разработан и апробирован *подход восстановления скоростей по суммарным статическим поправкам*. На основе анализа когерентности суммарных разрезов была выбрана томографическая модель рефрактора (рис. 5в). После применения томографических статических поправок были рассчитаны остаточные статические поправки и сформированы итоговые суммарные статические поправки (рис. 5г).

Статические поправки по модели рефрактора рассчитываются по классической формуле: $\Delta t = t_F - t_I$, где t_F – время от промежуточного уровня вверх до финального плоского уровня приведения (задаётся со скоростью замещения 1600 м/с), t_I – суммарное вертикальное время вниз до промежуточного уровня. Из-за локального присутствия высокоскоростных прослоек ММП глубины промежуточного уровня в любой послойной модели рефрактора систематически завышаются, а скорости оказываются существенно осреднёнными.

Для восстановления итоговой модели скоростей V_P использован следующий подход:

- Из применённой суммарной статики с учётом остаточной статики вычислено эффективное вертикальное время: $t_I = t_F - \Delta t$
- После введения дополнительных поправок за вертикальное время по ПВ и сглаживания на базе 1000 метров полученное t_I разложено на длинно- и короткопериодную компоненты. Короткопериодная и пропорциональная часть длиннопериодной компоненты (1/4) была использована для расчёта скоростей в верхнем слое 0-20 м (сезонно-талый слой и торф), а остальная часть длиннопериодной компоненты статики (3/4) для расчёта скоростей в подстилающей толще 20-100 м.

Верификация выполнялась путем сопоставления со скоростями, полученными по вертикальным временам (uphole time). Томографическая модель характеризуется сглаженным распределением скоростей и слабой выраженностью короткопериодных латеральных вариаций (рис. 5в). На рис. 5в видно, что в интервале глубин 0-20 м значения скоростей в томографической модели изменяются преимущественно в диапазоне 1300-1600 м/с, что существенно уже по сравнению с диапазоном 400-3000 м/с, наблюдаемым в восстановленной модели. При отображении карты средних скоростей томографической модели в той же цветовой палитре, что и на рис. 5д, е, она была бы представлена преимущественно оттенками зеленого цвета, без выраженной пространственной дифференциации. Поскольку основным объектом исследования являлся верхний интервал 0-20 м, где латеральная изменчивость скоростей наиболее выражена и непосредственно связана с литологической неоднородностью, потребовалась дополнительная коррекция скоростной модели с использованием короткопериодной компоненты статических поправок. Базовая модель была построена по первым вступлениям преломленных волн, тогда как для расчета короткопериодных поправок использовались

данные 3D-сейсморазведки по отраженным волнам. Таким образом, итоговая скоростная модель представляет собой комплексный результат совместного использования данных МПВ и ОГТ.

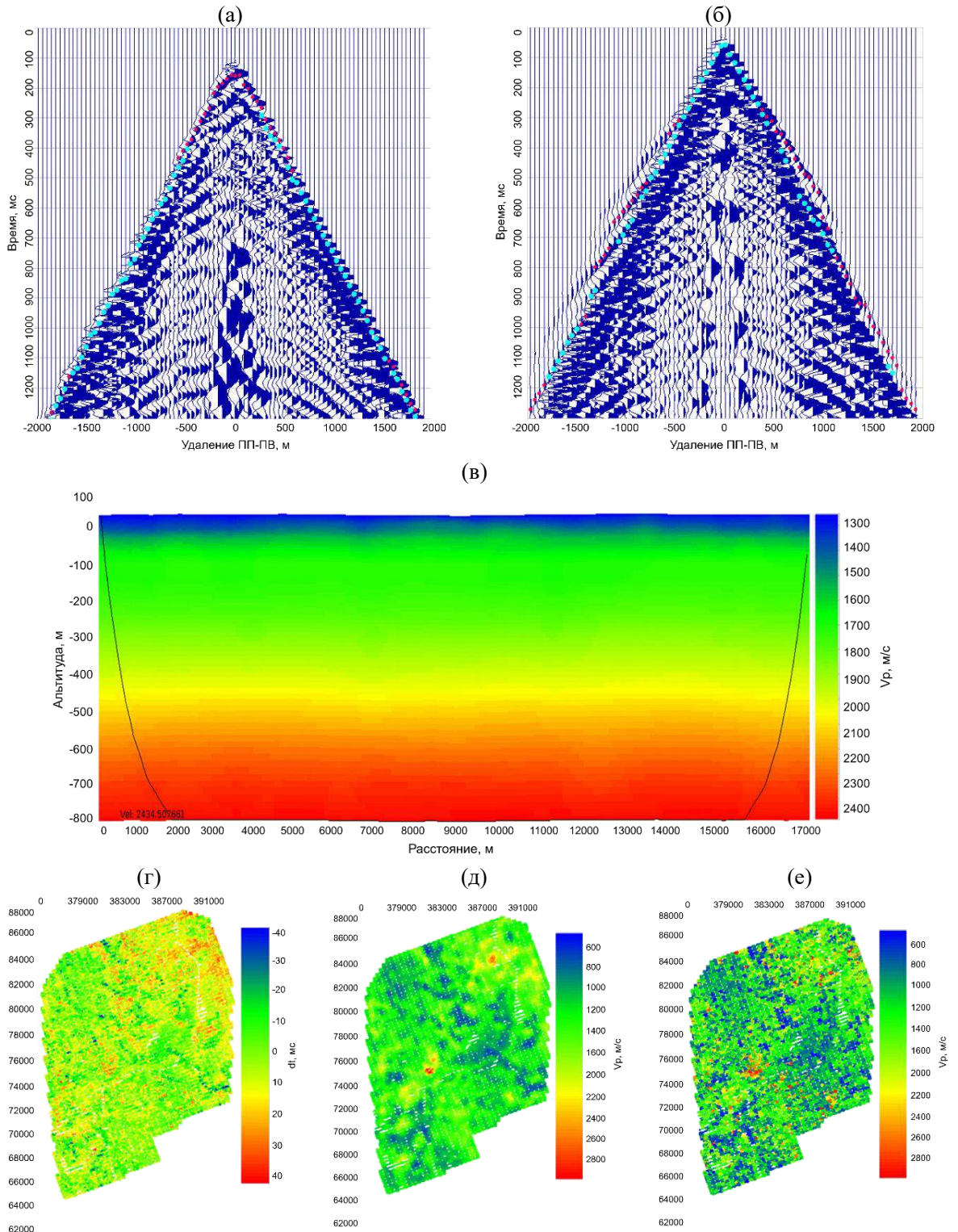


Рисунок 5. Основные этапы модифицированной версии МПВ: примеры сейсмограмм с малыми (а) и большими (б) ошибками пикирования времен вступлений первого рефрактора, томографическая модель рефрактора (в), суммарные статические поправки (г), восстановленные скорости продольной волны (д), скоростная модель по вертикальным временам (е).

Автоматизация метода MASW для построения скоростной модели поперечной волны.

Скоростная модель V_S строится согласно модифицированному графу обработки по методу MASW, который включает специализированный этап предварительной обработки кластеризации данных в профильную систему наблюдений, помехоустойчивый спектральный анализ поверхностных волн с использованием адаптивного SFK-преобразования и нейросетевое извлечение дисперсионных кривых, а также последующую инверсию методом локальной оптимизации с учётом априорной информации о модели V_P . На этапе постпроцессинга осуществляется количественный контроль качества инверсии, интерполяция и сглаживание моделей для восстановления куба скоростей V_S .

На этапе *предварительной обработки* входные 3D данные в сортировке ОПВ сводятся к данным правофланговой расстановки, необходимым для дальнейшего спектрального анализа поверхностных волн. Для этого применяется кластеризация координат пунктов приема (ПП) алгоритмом k-средних по шести секторам окружности с центром в точке пункта возбуждения (ПВ). В пределах каждого сектора выполняется обрезка данных по удалению ПВ – ПП в пределах от 100 м до 1000 м, в которых преобладает сигнал поверхностной волны (рис. 6а). Координаты привязки результирующей модели V_S рассчитываются как геометрический центр каждого сектора. Затем выполняется регуляризация сейсмотрасс каждой сейсмограммы методом ALFT (Amplitude and Local Frequency Transform), что позволяет восстановить трассы с регулярным шагом между ПП, а также значительно снизить эффект аляйсинга. Сейсмограммы со слабым коррелируемым сигналом поверхностной волны исключаются из дальнейшей обработки по заданному пороговому значению отношения сигнал/шум ($SNR = 0.5$). Значение регулярного сигнала поверхностной волны определяются через функцию взаимной корреляции (ФВК), рассчитываемую от трассы к трассе во временном окне в пределах заданных диапазонов кажущихся скоростей поверхностной волны (50-1000 м/с).

Этап спектрального анализа направлен на извлечение дисперсионных кривых поверхностных волн в пространстве распределения сейсмических амплитуд в координатах фазовая скорость (V_{ph}) – частота (f) (дисперсионное изображение), т. е. как функций $V_{ph}(f)$. Точность извлечения $V_{ph}(f)$ критически важна, поскольку ошибки на этом этапе неизбежно проецируются на результаты инверсии. Поэтому для построения дисперсионного изображения в работе применяется зарекомендовавший себя помехоустойчивый адаптивный алгоритм SFK-преобразования [Serdyukov et al., 2019], который автоматически выполняет поиск и усиление сигнала поверхностной волны в частотно-временном пространстве обеспечивая повышенное по сравнению с классическим методом 2D FFT разрешение и выделение дисперсионной кривой на фоне техногенного и случайного шума. Для автоматического извлечения $V_{ph}(f)$ используется разработанная сверточная нейронная сеть – автоэнкодер (АЕ) [Яблоков и др., 2025]. Входом сети АЕ является нормализованное дисперсионное изображение (рис. 6б), выходом – бинарная маска, где 1 – область целевого сигнала, а 0 – шум и артефакты спектра. Из совокупности пикселей, маркирующих область сигнала, строится $V_{ph}(f)$ путем кусочно-линейной аппроксимации (рис. 6б, зеленая кривая). Результаты тестирования обученной АЕ на синтетическом наборе данных, созданном путём численного моделирования волновых полей в различных скоростных моделях и содержащем различные шумы в виде сигналов старших мод поверхностной волны, артефактов преобразования и аляйсинга, показывают эффективность построения масок сигнала даже при наличии помех: бинарная точность 97%, точность прогноза 95%, полнота 94%.

Далее восстанавливается слоистая (1D) скоростная модель поперечной волны V_S от глубины z (рис. 6в, красная кривая) ($V_S(z)$) путем *инверсии* каждой извлеченной $V_{ph}(f)$. В основе инверсии лежит расчет прямой задачи, т.е. вычисления синтетической $V_{ph}^{synth}(f)$ для текущей 1D-модели, заданной параметрами: $V_S(z)$, $V_P(z)$, $\rho(z)$ (плотность) и z . В ходе решения обратной задачи минимизируется функционал невязки, т.е. расхождение между извлеченной и синтетической кривыми:

$$\mathcal{E} = \|V_{ph}(f) - V_{ph}^{synth}(f)\|_2.$$

В работе применяется метод локальной минимизации – алгоритм Оккама, который итеративно уменьшает функционал невязки, подбирая гладкую скоростную модель $V_s(z): \mathcal{E}^2 + \mu R \rightarrow 0$, где μ и R – параметры регуляризации, отвечающие за гладкость модели. При этом стартовая модель V_s^{start} (рис. 6в, серая кривая) рассчитывается по извлеченной $V_{ph}(f)$ с применением переводных коэффициентов для однородной модели [Foti, 2015]. Стоит отметить, что еще одним преимуществом разработанного метода является возможность учета априорной модели V_p в процессе инверсии. Для этого каждой $V_{ph}(f)$ сопоставлялась ближайшая V_p и применялось жёсткое ограничение через связь V_p/V_s^{start} .

На заключительном этапе *постпроцессинга* для построения итогового куба скоростей поперечной волны (рис. 6г) выполняются следующие ключевые процедуры: количественный контроль качества инверсии по рассчитанной метрике MAPE (Mean Absolute Percentage Error) между извлеченными и восстановленными дисперсионными кривыми – кривые с ошибкой выше 10% отбраковываются; интерполяция восстановленных 1D-моделей скоростей V_s на регулярную сетку с заданными шагами: $dz = 1$ м, $dx = 25$, $dy = 25$ м; адаптивное сглаживание для подавления шума и артефактов в скоростных разрезах с сохранением литологических границ; заполнение пропусков на основе соседних успешных результатов в местах, где инверсия не дала надёжный результат.

В дополнение к полученному результату независимо была выполнена контрольная обработка данных СРР стандартным методом MASW с помощью средств промышленных программных пакетов Echos и SeisPro. Однако полученная V_s имеет слабо детализированную и сглаженную структуру, меньше согласуется с данными ДЗЗ. Поэтому в качестве основного варианта для прогноза зон ОПИ использованы результаты модифицированного метода MASW, а сопоставление двух подходов приведено в приложении к настоящей статье.

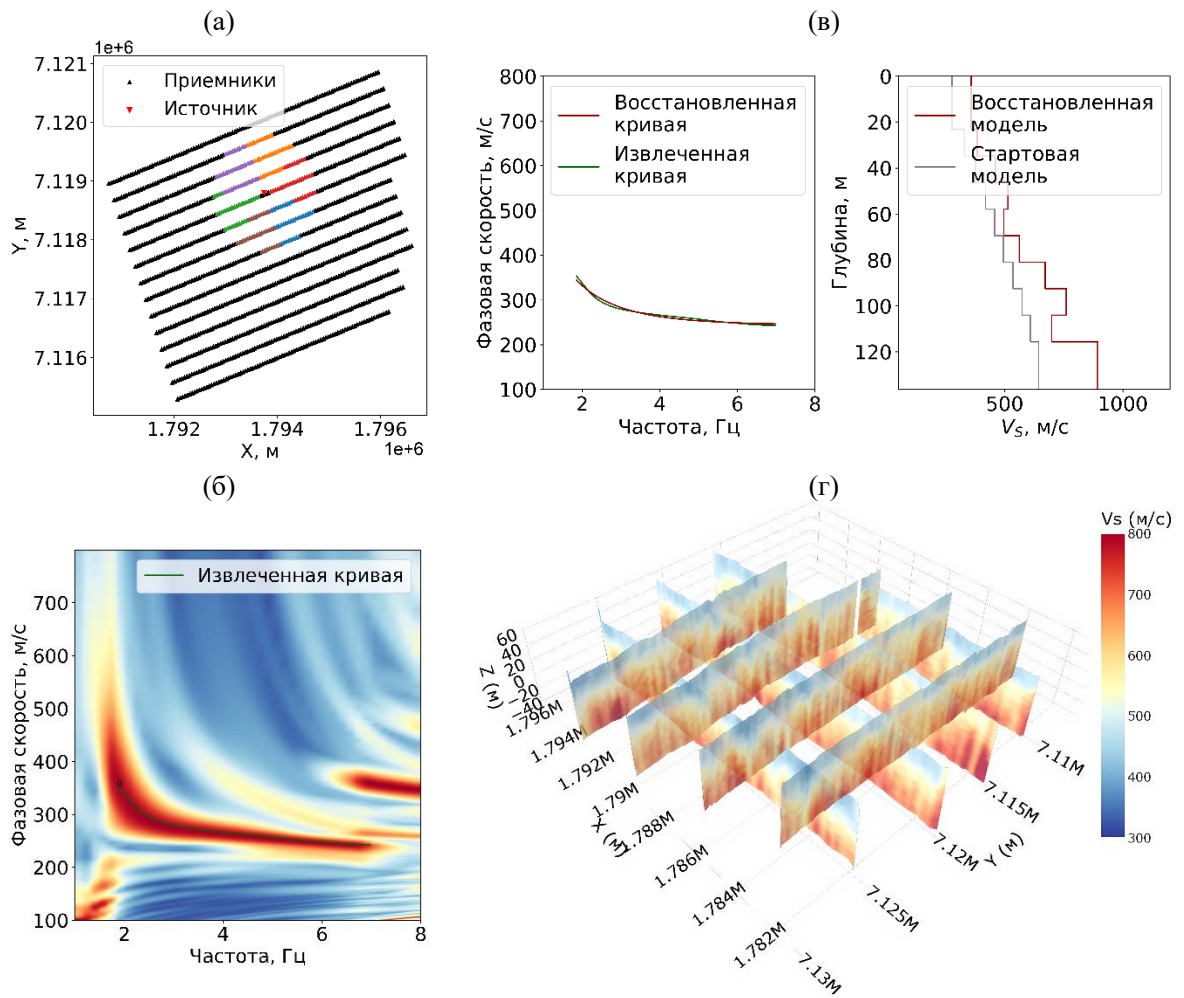


Рисунок 6. Основные этапы обработки по методу MASW: (а) препроцессинг – кластеризация координат приемников и регуляризация сейсмограмм внутри каждого сектора, (б) помехоустойчивый спектральный анализ для данных каждого сектора и нейросетевое извлечение дисперсионной кривой, (в) инверсия кривой и восстановление 1D скоростной модели, (г) интерполяция, сглаживание и построение куба скоростей поперечной волны.

Атрибутивный анализ и извлечение новых признаков. Качество полевого сейсмического материала определяется не только погодными условиями и техногенными помехами, но и свойствами ВЧР. Как упоминалось ранее в ключевыми атрибутами являются *интервальные скорости продольных и поперечных волн V_p и V_s* , рассчитанные в интервале глубин 0–20 м, их *отношение V_p/V_s* , а также *RMS-ошибка первого рефрактора (F_{pick_error})*, который маркирует зоны наличия ММП и инверсии скоростей. Однако, неоднородности ВЧР также вызывают вариации амплитуды сигнала, доминирующей частоты и временных задержек на сейсмограммах. В то время как в традиционной камеральной обработке эти эффекты стремятся компенсировать, в настоящей работе они целенаправленно используются как дополнительный источник информации о строении ВЧР. Для оценки частотного состава полевых данных выполнен спектральный амплитудный анализ в нескольких полосах частот, на основе которого рассчитан комплекс промежуточных атрибутов, необходимых для вычисления спектрально-взвешенного отношения «сигнал – микросейсмы» (SWSNR). В работе [Семашев и др., 2023] показано, что доминирующая частота не является самодостаточным атрибутом, поэтому качество полевого материала целесообразно оценивать по единому интегральному атрибуту SWSNR. Среди промежуточных атрибутов выделен наиболее информативный параметр – *амплитудный вес высоких частот (w_3)*, характеризующий степень

затухания высокочастотной части спектра сигнала. Латеральные вариации w^3 демонстрируют выраженную корреляцию с картой распространения лесистой растительности на Харампурском ЛУ, что указывает на связь этого атрибута с изменчивостью связности грунтов верхнего слоя. Наиболее близким физическим аналогом влияния на частотный состав сейсмического поля является добротность (Q): её снижение приводит к более интенсивному затуханию высоких частот, при этом связность породы как петрофизическая характеристика напрямую коррелирует с Q [Методические рекомендации по определению ..., 1972]. Несмотря на то, что прямое определение добротности ВЧР по данным 3D CPP затруднено из-за отсутствия надёжных записей отражённых волн в тонком верхнем слое, атрибут w^3 позволяет косвенно отслеживать латеральные вариации добротности и сопоставлять их с литологическим составом грунтов.

Дополнительно был рассчитан атрибут *Elev_Slope*, характеризующий *морфометрию (градиент) рельефа* и отражающий уклоны и микроформы поверхности, что обеспечивает учёт геоморфологических факторов при интерпретации.

Совместный анализ указанных атрибутов с топографическими картами и космическими снимками, на которых прослеживаются элементы рельефа (холмы, поймы, западины), типы растительности (редколесье, беломошники) и литологические разности (пески, торф, суглинки), позволил установить ряд устойчивых эмпирических связей. Показано, что низкие значения w^3 в сочетании с высокими значениями *Fbpick_error*, как правило, приурочены к дисперсным песчаным отложениям, тогда как вариации *Elev_Slope* фиксируют границы термокарстовых форм. Указанные признаки интегрированы в процедуру кластерного анализа и используются для выделения фаций, потенциально связанных с зонами развития ОПИ.

ПОЛУЧЕННЫЕ ФАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результат анализа пространственного распределения скоростных и атрибутивных характеристик ВЧР. Переобработка данных 3D CPP методами МПВ и MASW позволила построить детальные карты интервальных скоростей V_p , V_s и их отношения V_p/V_s для верхней 20-метровой толщи. Анализ показал четкую пространственную дифференциацию, тесно связанную с литологией и геоморфологией (рис. 7).

Установлен общий тренд: минимальные значения скоростей упругих волн приурочены к песчаным отложениям, а максимальные к суглинисто-глинистым, что согласуется с классическими представлениями о влиянии пористости на упругие свойства грунтов. В соответствии с этим трендом на картах выделяются две основные зоны с пониженными скоростями: 1) субмеридиональная зона, окаймляющая камовые холмы с востока, и 2) южная зона аллювиальной поймы реки Анты-Яха.

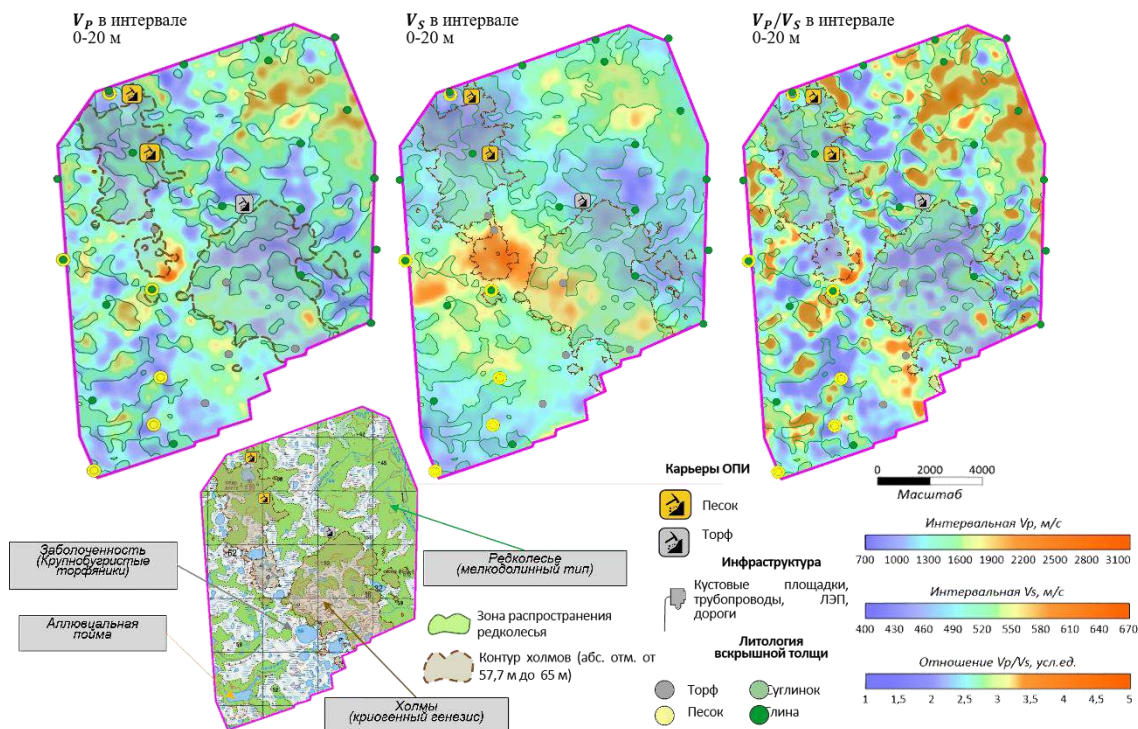


Рисунок 7. Результаты анализа интервальных скоростей.

Карты диагностических атрибутов (рис. 8) дополняют и детализируют скоростную модель, предоставляя независимые индикаторы свойств ВЧР.

- Атрибут w_3 выступает индикатором степени связности грунтов. Минимальные значения данного атрибута оконтуривают границы редколесья и соответствуют распространению хорошо связных и слабосвязных пород: от глин до легких суглинков с песком. Этот вывод следует общему тренду: чем выше дисперсность породы, тем меньше ее связность, что отражается в росте значений w_3 . Таким образом, аномалии повышенного w_3 указывают на зоны развития дисперсных, несвязных отложений.
- Атрибут $Fbpick_error$ демонстрирует четкие пространственные закономерности – его максимальные значения (22-30 усл.ед.) приурочены к камовым холмам в субмеридиональном простирании, где он, вероятно, оконтуривает зоны развития ММГ и резких литологических границ. Критически важно, что аллювиальная пойма реки Анты-Яха данным атрибутом не выделяется, что является ее отличительным диагностическим признаком.
- Атрибут $Elev_Slope$ четко окаймляет положительные и отрицательные формы микрорельефа. Он фиксирует крутые уступы склонов ледникового контакта, а также микроформы, с которыми связано развитие торфяников разного типа (гривистая пойма).

Совместный анализ атрибутов подтверждает наличие дисперсных пород: аномалии, выделяемые по высокому w_3 (низкая связность), коррелируют с максимумами $Fbpick_error$ и $Elev_Slope$. Комплекс этих признаков позволяет дифференцировать типы дисперсных отложений: приуроченные к камам (с влиянием ММП) и аллювиальные (без выраженного проявления в $Fbpick_error$).

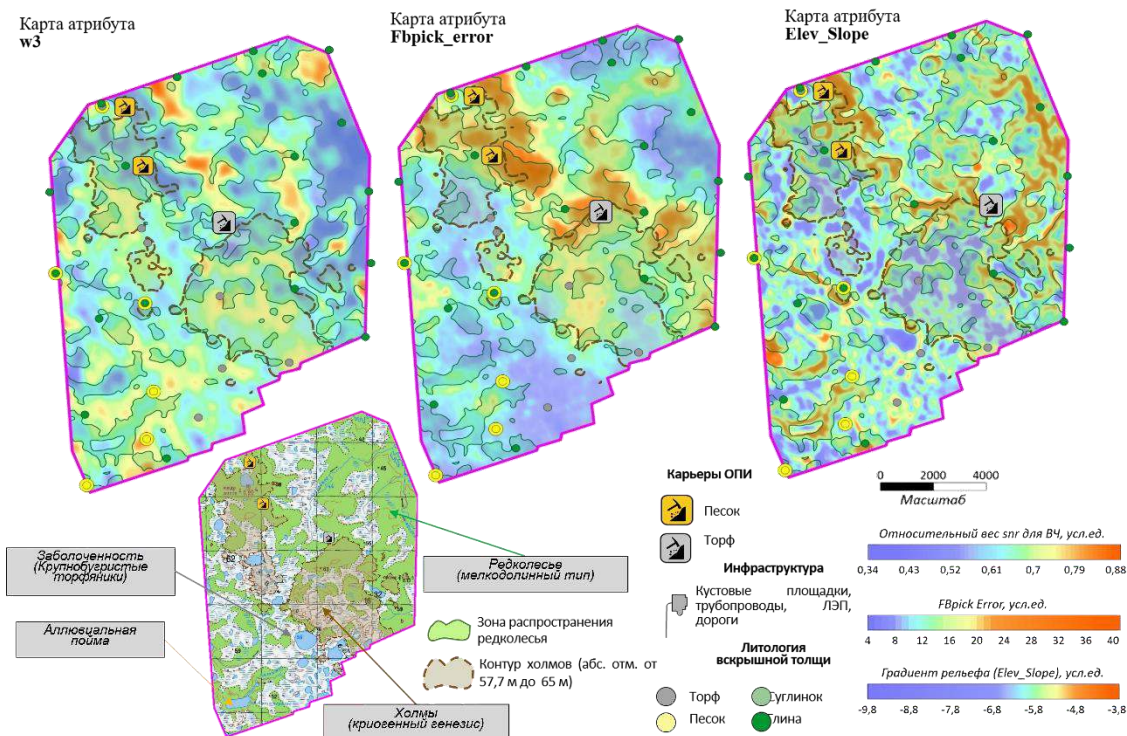


Рисунок 8. Результаты атрибутного анализа и установление корреляционных связей с ландшафтно-геоморфологическими характеристиками.

Выявление ландшафтно-геоморфологических закономерностей и формирование поисковых признаков. Интеграция геофизических полей с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и топографии позволила выявить устойчивые типы ландшафтных индикаторов, ставших основой для сейсмогеологического моделирования:

- *Тип 1 – камовые холмы:* приурочены к дренированным положительным формам рельефа (склоны и вершины холмов), на которых развиты сосново-лишайниковые «беломошники» или лиственнично-кедровые редколесья. Комплексный геофизический признак включает: относительно пониженные значения V_p и V_s на фоне региона, повышенные значения атрибута w_3 (как индикатор дисперсности несвязных песков), максимумы атрибута $Fbpick_error$ (маркирующие зоны развития ММП и резких литологических границ в пределах холмов), а также характерные формы рельефа, выделяемые атрибутом $Elev_Slope$.
- *Тип 2 – аллювий пойм и русел:* связаны с элементами пойменного рельефа: прирусловыми валами, гривистой поймой, где на космоснимках наблюдаются песчаные раздувы и произрастает низкорослое редколесье. Ключевым отличительным признаком данного типа является отсутствие выраженных аномалий по атрибуту $Fbpick_error$. Диагностика основана на сочетании пониженных скоростей (V_p , V_s) с повышенными значениями w_3 и характерным распределением $Elev_Slope$, подчеркивающим микроформы поймы.
- *Тип 3 – грядово-мочажинные болота:* визуально идентифицируются на снимках по характерному рисунку – чередованию вытянутых светлых (растительные гряды) и темных (водонасыщенные мочажины) полос, ориентированных перпендикулярно направлению стока. Наиболее надежным геофизическим критерием являются экстремально низкие значения V_p (<950 м/с) и отношения V_p/V_s (<2.1), а также максимальные на площади значения атрибута w_3 , что соответствует крайне дисперсной и обводненной природе торфяной залежи.

Построенные физико-геологические модели залегания ОПИ. На основе интеграции установленных корреляций, данных бурения МСК и ландшафтных индикаторов сформированы три

типовые физико-геологические модели (ФГМ), количественно описанные в таблицах 1-3 и проиллюстрированные на рисунках 8-10.

ФГМ типа 1 – камовые холмы (таблица 1 и рис. 9) характеризуется мощной толщей дисперсных песков, вскрытой в карьерах-эталонах «Т9» и «Север». В пределах контуров этих объектов измерены диапазоны скоростей и атрибутов, выступающие эталонными для данного типа: V_p от 990 до 1384 м/с, V_s от 452 до 478 м/с, V_p/V_s от 2.17 до 3.04. Атрибуты, указывающие на дисперсность и неоднородность, имеют значения: $w3$ – 0.49-0.63, $Fbpick_error$ – 13.53-29.99 усл.ед. Полезная толща песков мощностью 11-16 м часто подстилается более глинистыми разностями, а в верхней части может быть перекрыта маломощным сезонно-талым слоем или торфом.

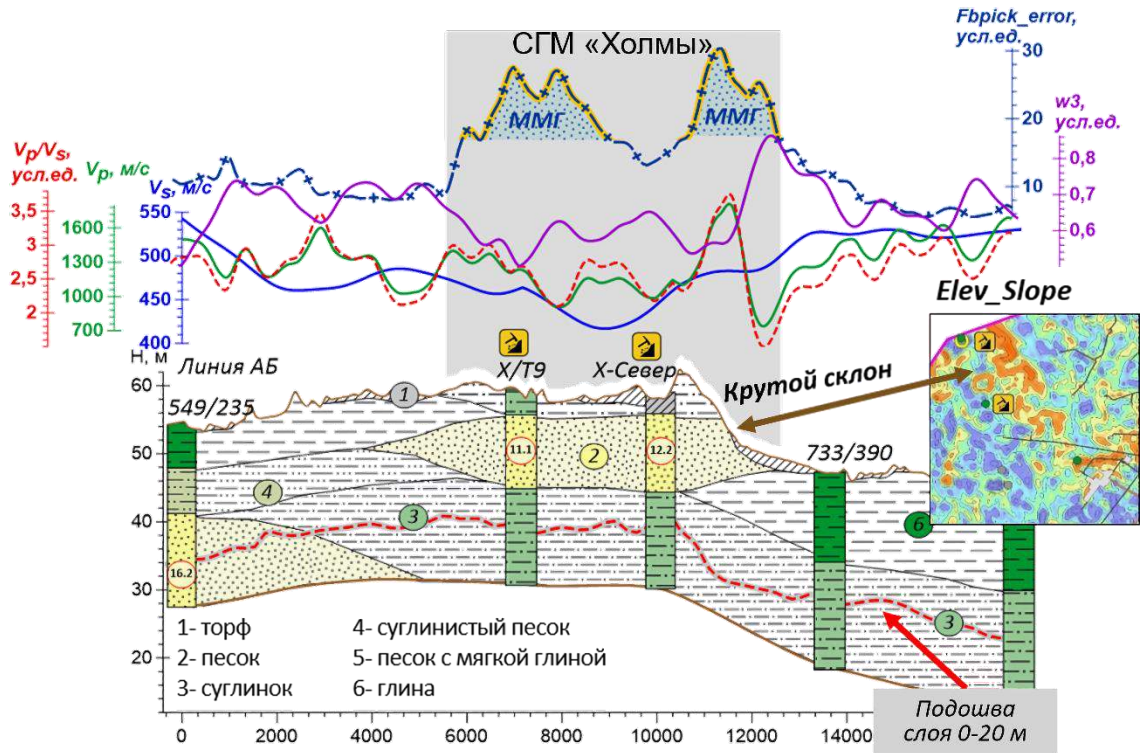


Рисунок 9. Физико-геологическая модель типа 1 – камовые холмы.

Таблица 1. Геоморфологическая характеристика построенной физико-геологической модели типа 1 – камовые холмы.

Поисковый тип залегания	Лимный (IШЗ-4) термокарстовых озер на склонах и вершинах холмов (камов), осложненных короткими крутостенными уступами		
Рельеф	Куполовидные крутосклонные холмы, часто с плоскими вершинами. Крутые уступы (склон ледникового контакта)		
Растительность	Лиственнично-елово-кедровое редколесье, сосново-лишайниковые леса, боры-«беломошники»		
Объект-аналог: действующие карьеры в пределах площади (эталон)	Месторождение песка в районе Т9 Месторождение песка Север		
Фации	Залегание	Скважина	Мощность, м
Песок	Восточный крутой	Т9	~ 11,1
		Север	~ 12,2
	Западный пологий	549/235	~ 16,3
Суглинистый песок	Западный пологий	549/235	~ 6,9
Песок с глиной	Северный (в 450 м от месторождения «Север»)	653/386 (обвод.)	~ 25,5
		621/175	~ 9,2

ФГМ типа 2 – аллювий пойм и русел (таблица 2 и рис. 10) описывает строение аллювиальных равнин. Для пойменных фаций (скв. 573/39, 579/84) характерны пониженные значения V_p (863-1184 м/с) при V_s 469-478 м/с и низком V_p/V_s (1.82-2.52), что свидетельствует об обводнении. Атрибут w_3 находится в диапазоне 0.61-0.76. Мощность слоя относительно чистых аллювиальных песков невелика (~2.3 м), и он залегает на глинистом аллювии стариц, где V_p повышается до 1266-1330 м/с (скв. 501/13). Ключевой диагностической чертой, отраженной в модели, является отсутствие выраженных аномалий по атрибуту $Fbpick_error$ в аллювиальной пойме.

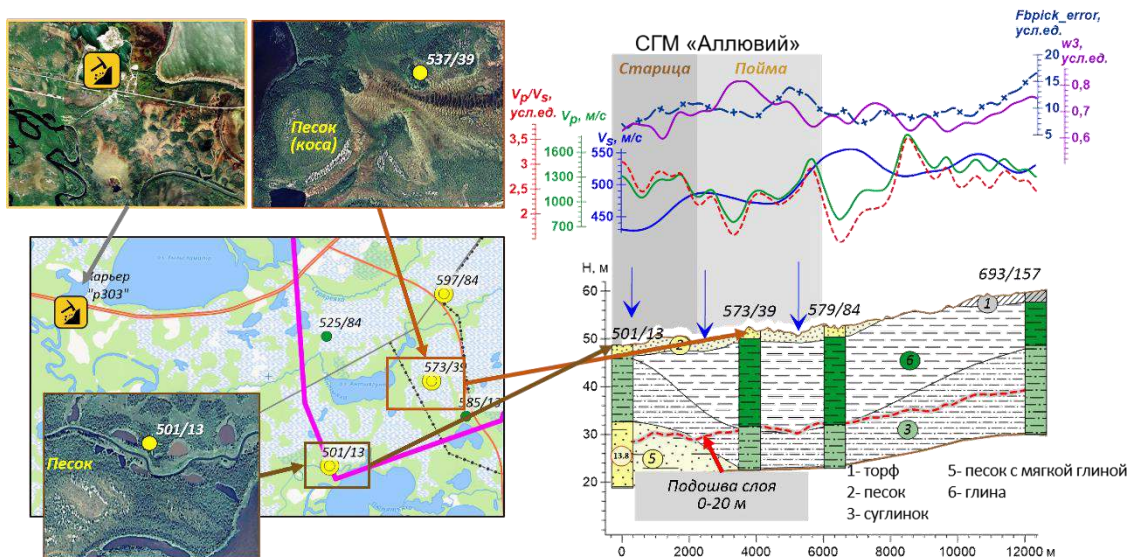


Рисунок 10. Физико-геологическая модель типа 2 – аллювий пойм и русел.

Таблица 2. Геоморфологическая характеристика построенной физико-геологической модели типа 2 – аллювий пойм и русел.

Поисковый тип залегания	Аллювий пойменных террас и русла (αН), преимущественно река Анты-Яха (притока р. Харампур)		
Рельеф	Пойменный, прирусловые валы		
Растительность	Низкорослые хвойные, редколесье, кустарничковые		
Объект-аналог: в 3,5 км на ЮЗ выше по течению р. Харампур	Месторождение торфа в районе р303 Харампурский ЛУ		
Фации	Залегание	Скважина	Мощность, м
Песок	Пойма	573/39	~ 2,2
		579/84	~ 2,3
		501/13	~ 2,3
Песок с глиной	Старица	501/13	~ 13,8

ФГМ типа 3 – крупнобугристые (КБТ) и грядово-мочажинные комплексы (ГМК) болот (таблица 3 и рис. 11) идентифицируется по наличию в кровле разреза слоя торфа. Для промышленно значимых объемов торфяников ГМК (эталон «Х-Торф») зафиксированы минимальные на площади скорости: V_p 807-952 м/с, V_p/V_s 1.71-2.04, а также максимальные значения атрибута w_3 (0.73-0.87), что соответствует крайней дисперсности и обводненности. Мощность торфяной залежи ГМК достигает ~5.0 м. КБТ, приуроченные к буграм пучения, имеют меньшую мощность (~2.3 м) и проявляются в аномалиях V_s и $Fbpick_error$, связанных с наличием ледяных ядер.

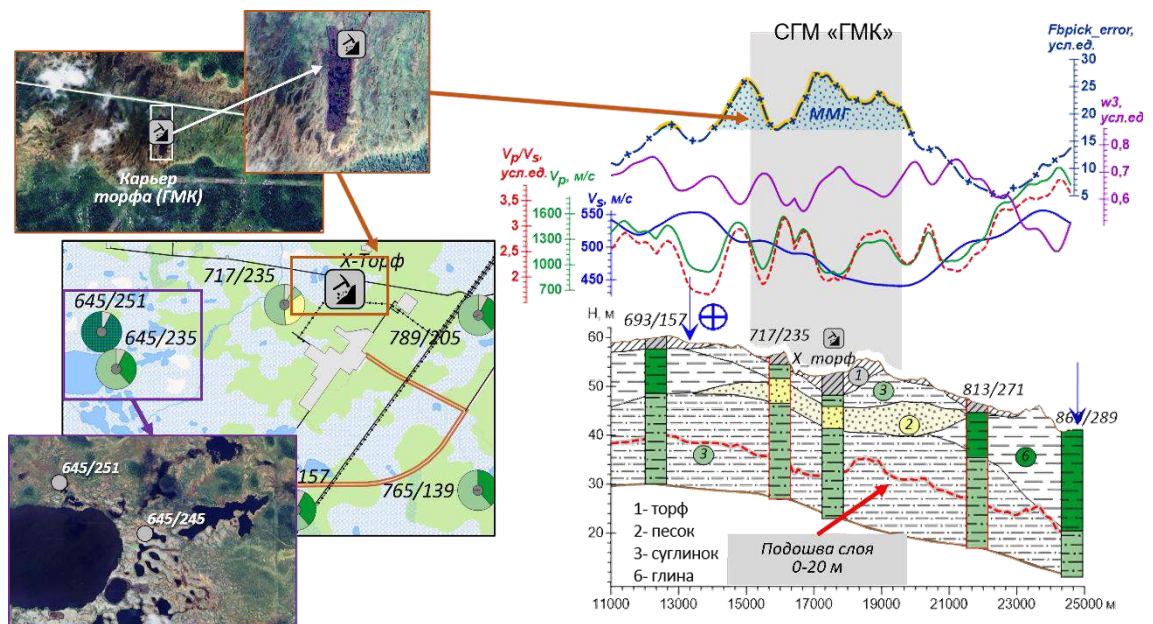


Рисунок 11. Физико-геологическая модель типа 3 – крупнобугристые (КБТ) и грядово-мочажинные комплексы (ГМК) болот.

Таблица 3. Геоморфологическая характеристика построенной физико-геологической модели типа 3 – крупнобугристые (КБТ) и грядово-мочажинные комплексы (ГМК) болот.

Поисковый тип залегания	Лимный и полюстрий (LPH) КБТ и ГМК верховых болот		
Рельеф	КБТ – бугры высотой до 3 м, ГМК – пологие склоны водотоков		
Растительность	Болотные кустарнички, травы, мхи-лишайники (ягельник), осока топяная, сфагнум, резе карликовые сосны, березы		
Объект-аналог: действующий карьер в пределах площади (эталон)	Месторождение торфа в районе р303 Харампурский ЛУ		
Фации	Залегание	Скважина	Мощность, м
Торф (КБТ)	Западный склон камов, проходимые болота	645/251	~ 2,3
		645/235	~ 2,3
		669/84	~ 2,3
Торф (ГМК)	Восточный склон камов, непроходимые болота-топи	653/386	~ 4,6
		X-Торф	~ 5,0

Результаты кластерного анализа и комплексная прогнозная оценка. Для объективного зонирования территории по сходству геофизических и морфометрических признаков был применен алгоритм k-средних (k-means) без обучения [Kaufman and Rousseeuw, 1990]. Выбор подхода без обучения на данном этапе исследований был стратегическим и обусловлен двумя ключевыми факторами: 1) наличием на тестовой площади уникального набора верифицированных данных — контуров действующих карьеров и результатов МСК с литологическим описанием, что позволяло калибровать и интерпретировать получаемые кластеры; 2) требованием к разрабатываемой технологии быть универсальной и применимой на новых площадях, где подобная априорная информация (обучающая выборка) может полностью отсутствовать. Кластеризация без обучения, не требующая заранее размеченных данных, соответствует задаче первичного выявления естественной структуры данных и построения прогнозной карты в условиях дефицита эталонов.

В качестве входных параметров для алгоритма k-средних использовались нормализованные значения шести ключевых признаков: V_p , V_s , V_p/V_s (в интервале 0-20 м), $w3$, $Elev_Slope$, $Fbpick_error$. Учитывая неоднородность площади (сочетание холмов, поймы и болот), предварительный анализ проводился отдельно для зон, соответствующих будущим ФГМ «Холмы/Торф» и «Аллювий».

Оптимальное количество кластеров оценивалось с использованием стандартных метрик, основанных на минимизации внутрикластерной дисперсии, включая анализ «локтя» (elbow method) и метод силуэта (silhouette analysis) [Kaufman and Rousseeuw, 1990; Kodinariya, and Makwana, 2013]. Для обеих зон формальные критерии стабильно указывали на оптимальность шести кластеров [Kodinariya, and Makwana, 2013]. Однако последующий геологический анализ показал, что такое разделение недостаточно детально дифференцирует литологические типы, представляющие интерес для поиска ОПИ. Это объясняется тем, что входные атрибуты представляют собой характеристики, осредненные по 20-метровому интервалу, в котором различные литотипы (пески, суглинки, торф) разной мощности могут формировать близкие интегральные сейсмические отклики.

Для достижения большей геологической интерпретируемости и четкого разделения промышленных залежей песков, торфа и переходных фаций, количество кластеров было увеличено. Подобная практика, когда окончательный выбор числа кластеров основывается на интерпретируемости результатов, а не исключительно на формальных статистических критериях, является общепринятой в геонауках [Davis and Sampson, 1986; Cracknell and Reading, 2014]. В результате для объединенной территории была построена комплексная карта из девяти «фаций-кластеров» (рис. 12).

Комплексная карта
«фаций-кластеров»

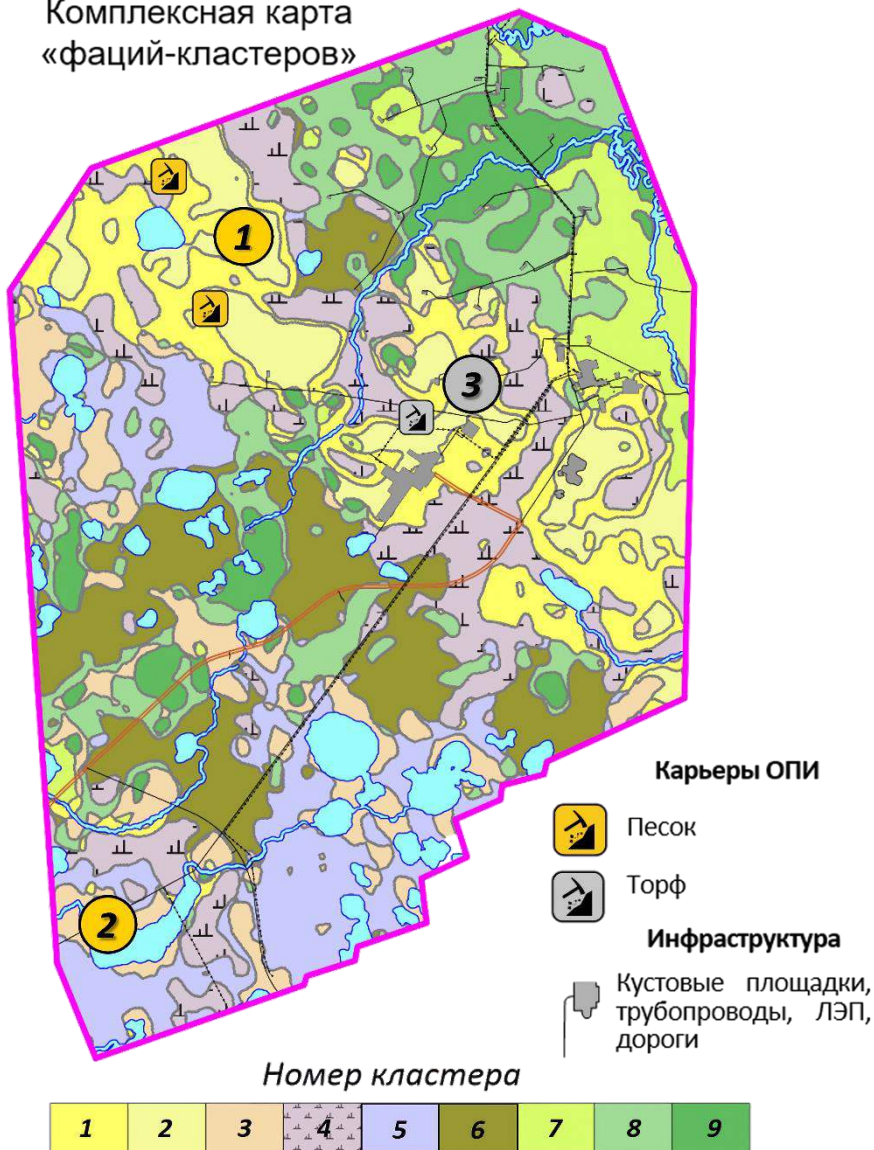


Рисунок 12. Карта фаций-кластеров.

Анализ средних значений параметров в каждом кластере позволил провести их геологическую интерпретацию и соотнести с ранее определенными ФГМ и эталонами:

- Кластеры 1 и 2 обладают свойствами ФГМ *Tuna 1*. Соответствуют ядрам камовых холмов с промышленными скоплениями песка (эталон «Север», «Т9»).
- Кластеры 3 и 7 интерпретированы как ФГМ *Tun 2* (аллювий) и переходные фации. Кластер 3 распространен в пойме р. Анты-Яха, кластер 7 – в русловых отложениях и фиксирует термокарстовые объекты. Могут содержать маломощные прослои песков.
- Кластер 4 обладает свойствами ФГМ *Tun 3 (ГМК)*. Соответствует мощным торфяникам (эталон «Х-Торф»).
- Остальные кластеры (5, 6, 8, 9) соответствуют вскрышным суглинкам, глинам, зонам развития ММП и сложным переходным обстановкам.

На основе карты «фаций-кластеров» построена итоговая прогнозная карта распространения ОПИ (рис. 13). Путем выделения ареалов кластеров 1 и 2 картированы перспективные зоны залегания песков с прогнозной мощностью 6-16 м. Выделены два наиболее перспективных участка в радиусе

≤5 км от инфраструктуры (рис. 14). Аналогично, по кластеру 4 выделены зоны развития торфа ГМК с прогнозной мощностью 3-5 м.

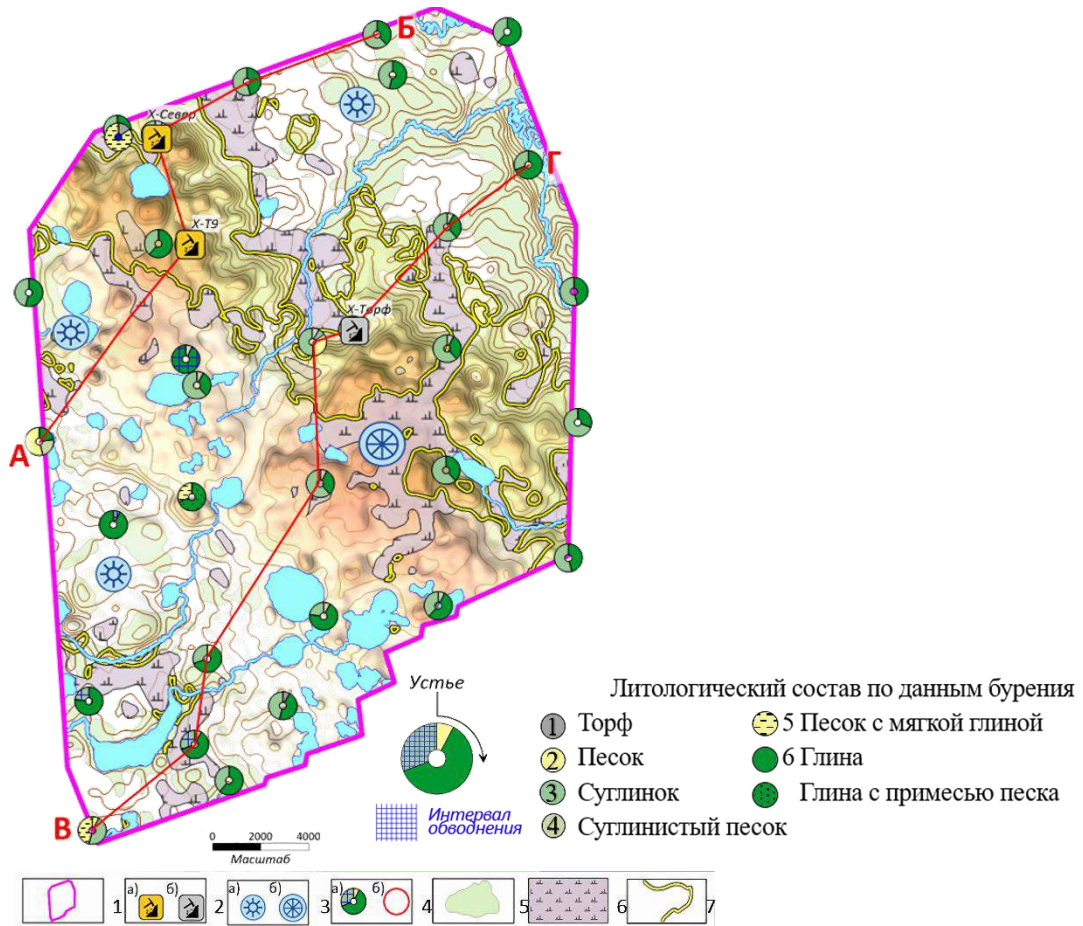


Рисунок 13. Итоговая прогнозная карта ОПИ.

Легенда: 1 – контур работ; 2 – карьеры ОПИ: а) пески, б) торф; 3 – а) термокарстовые элементы рельефа: а) инверсионные холмы, б) западины; 4 – скважины МСК: а) факт, б) модель; 5 – Зона распространения редколесья; 6 – перспективные зоны на ГМК; 7 – перспективные зоны на пески.

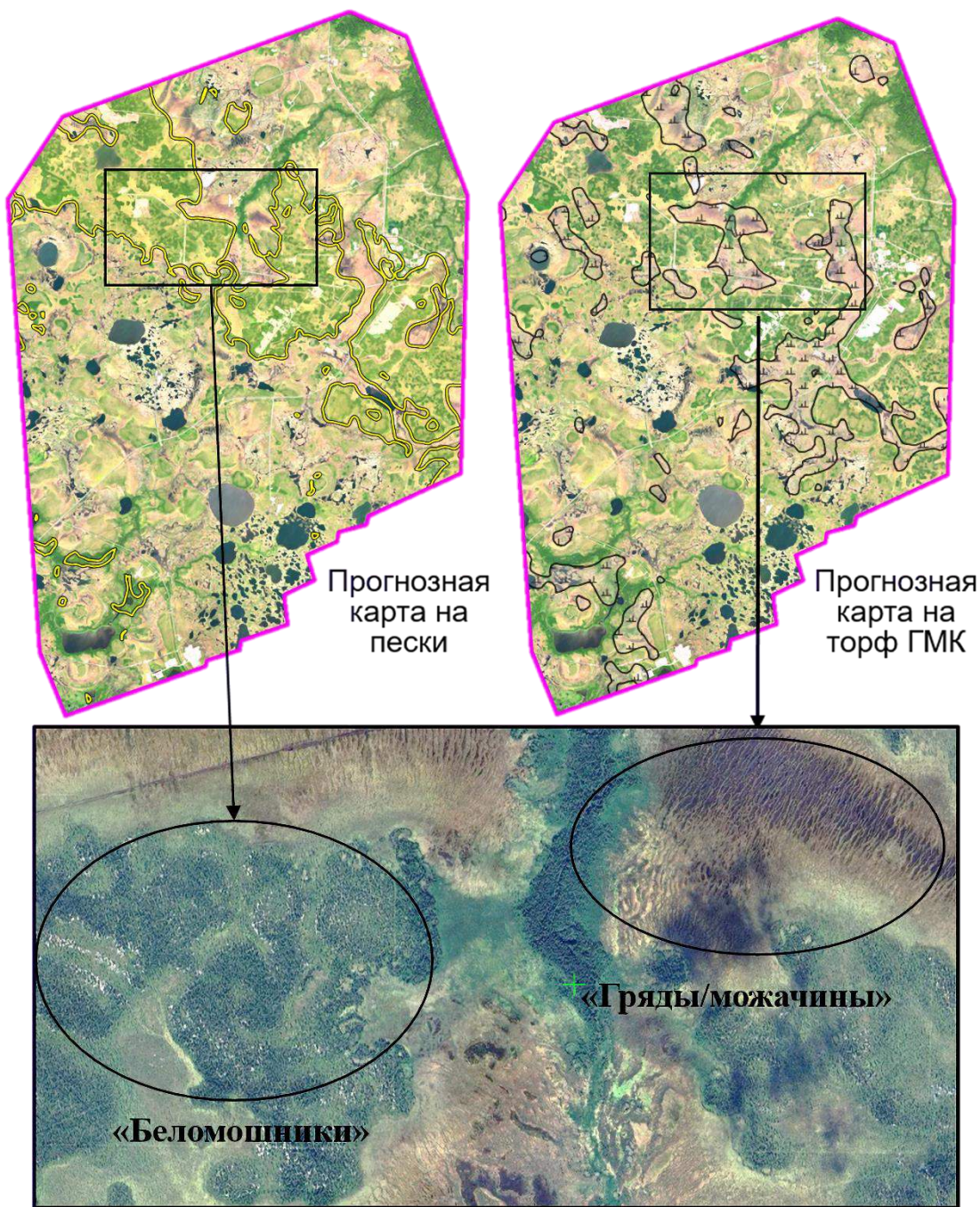


Рисунок 14. Выделенные наиболее перспективные участки на пески (6-10 м) и торф (3-5 м).

ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционные методы поиска ОПИ в условиях ММГ (сеть шнекового бурения, георадар, электротомография) сталкиваются с проблемами высокой стоимости мобилизации, сезонности и низкой производительности. На примере площади ~ 60 км² показано, что предложенный подход позволяет в течение нескольких недель получить непрерывные скоростные модели и прогнозную карту, детальность которой (латеральное разрешение $\sim 25-50$ м) эквивалентна сети бурения с густотой менее 500×500 м. Ключевое преимущество – отсутствие необходимости в новых полевых работах и использование уже существующего архива 3D-сеймики. Это приводит к сокращению сроков и стоимости изысканий на порядок, что критично для оперативного проектирования инфраструктуры.

Установленные корреляции между сейсмическими атрибутами и литологией имеют четкое физическое обоснование:

- Низкие скорости ($V_p < 1600$ м/с, $V_s < 500$ м/с) и низкое V_p/V_s (< 2.5) в песках и торфах объясняются их высокой пористостью и низкой связностью. Как следует из литературных данных, скорость упругих волн в рыхлых грунтах обратно пропорциональна пористости [Lin et al., 2023]. Для обводнённых торфов дополнительным фактором снижения V_p/V_s является наличие свободной воды в порах.
- Установленная обратная зависимость между значением атрибута $w3$ и степенью связности грунта (низкий $w3$ → высокая связность (глины, суглинки); высокий $w3$ → низкая связность (дисперсные пески, торф)) имеет четкое физическое обоснование. Высокие значения $w3$ в песках и особенно в торфах свидетельствуют о сильном затухании (низкой добротности Q) высокочастотной компоненты сейсмического сигнала, что характерно для рыхлых, несвязных сред с высоким поглощением. Минимальные значения $w3$, наблюдаемые на границах редколесий, соответствуют связным глинисто-суглинистым грунтам, обладающим лучшими упругими свойствами и меньшим поглощением высоких частот.
- Повышенные значения атрибута $Fbpick_error$ закономерно возникают в зонах резких латеральных изменений скоростей, вызванных либо литологическими границами (склон кама), либо наличием высокоскоростных линз ММП, создающих инверсию в разрезе и искажающих годограф рефрагированной волны.
- Наличие ММП повышает V_p и V_s , однако в исследуемом интервале 0-20 м доминирующее влияние оказывает сезонно-талый слой и литологический состав. Выделенные комплексные аномалии позволяют разделить влияние этих факторов.

Выделим наиболее перспективные направления развития предложенного подхода:

- Методология готова к применению на любой территории Западной Сибири и Арктики, где имеются данные 3D CPP.
- Результаты, полученные на Харампурском ЛУ (верифицированные «фации-кластеры» и эталонные объекты), формируют первую качественно размеченную обучающую выборку для региона. В перспективе это позволит перейти от кластеризации без обучения к методам с обучением (например, Random Forest, градиентный бустинг). Такие предобученные модели смогут с более высокой точностью и автоматизацией прогнозировать залежи ОПИ на новых, слабо изученных площадях.
- Обработка может быть распространена на более глубокие интервалы (20–100 м) для поиска песчано-гравийных смесей (ПГС). Повышения достоверности прогноза можно достичь за счет комплексирования с данными электроразведки (ВЭЗ, электротомография) и высокоразрешающего бурения для верификации на ключевых участках.

Тем не менее предлагаемый подход имеет свои ограничения:

- Эффективность методов обработки, особенно MASW, напрямую зависит от способа возбуждения и параметров исходного сейсмического сигнала. При использовании виброисточников или в условиях слабого акустического контраста ВЧР зарегистрированная энергия поверхностных волн может быть недостаточной, а их низкочастотная составляющая слабо выраженной, что ограничивает глубину и точность восстановления скоростной модели поперечных волн.
- Кластеризация без обучения выявляет статистически обособленные группы данных, но для их перевода в конкретные литологические типы («песок», «торф», «суглинок») и количественной оценки мощности требуется калибровка по данным бурения или эталонным объектам. Без такой верификации карта кластеров остаётся качественной геофизической моделью.

Для обеспечения промышленного внедрения предложенного подхода необходимы дополнительные исследования, включающие: (1) апробацию на независимых участках с различными геологическими условиями; (2) расширенную верификацию по данным бурения и инженерно-геологических изысканий; (3) анализ устойчивости нейросетевого извлечения дисперсионных кривых при различных уровнях шума и структуре волнового поля; (4) оценку чувствительности используемых атрибутов к параметрам съёмки и обработки; (5) развитие методики в направлении количественной оценки мощности и объёмов полезных ископаемых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования достигнуты следующие основные результаты:

1. Разработан и апробирован на Харампурском ЛУ комплексный подход к поиску ОПИ, основанный на специализированной переобработке архивных данных 3D-сейсморазведки методами МПВ и MASW с последующим атрибутивным анализом и машинным обучением.
2. Апробирована автоматизированная обработка данных методом MASW с применением помехоустойчивого спектрального анализа и нейросетевого алгоритма извлечения дисперсионных кривых, который независим от управляемых параметров, устойчив к шумам и артефактам, а также не требует переобучения нейросети для каждого нового участка.
3. Разработана методология комплексирования результатов метода МПВ, MASW и атрибутивного анализа для выявления залежей ОПИ в условиях сложного криогенного ландшафта ЯНАО с учётом геокриологических особенностей и влияния мерзлоты на физические свойства грунтов.
4. Установлены и количественно оценены репрезентативные диапазоны сейсмических атрибутов для основных типов залегания ОПИ: для промышленных песков в камах – V_p 990-1384 м/с, V_s 452-478 м/с, w_3 0.49-0.63; для торфов ГМК – V_p 807-952 м/с, V_p/V_s 1.71-2.04, w_3 0.73-0.87.
5. На основе интеграции геофизических, литологических и ландшафтных данных построены три верифицированные физико-геологические модели (ФГМ), соответствующие камовым холмам, аллювиальным равнинам и грядово-мочажинным болотам.
6. Путем кластерного анализа объективно зонирована территория на 9 «фаций-кластеров» и идентифицированы перспективные зоны, соответствующие ФГМ. Выделены и картированы участки для размещения карьеров песка (прогнозная мощность 6-16 м) и торфа (мощность 3-5 м) в непосредственной близости (≤ 5 км) от объектов инфраструктуры.

Проведённое исследование подтвердило возможность эффективного использования данных глубинной сейсморазведки для решения инженерно-геологических задач в условиях криолитозоны. Разработанная методология, интегрирующая модифицированные методы обработки (МПВ, MASW), атрибутивный анализ и машинное обучение, позволяет извлекать ранее неиспользуемую информацию о строении верхней части геологического разреза.

Полученные результаты обладают высокой практической значимостью для нефтегазовых компаний, осваивающих арктические и сибирские месторождения. Предложенный подход обеспечивает значительное сокращение сроков и стоимости работ за счёт отсутствия необходимости в дополнительных полевых изысканиях, минимизируя логистические риски и вероятность срыва графиков обустройства. Технология даёт возможность экспресс-оценки ресурсной базы общераспространённых полезных ископаемых (ОПИ), что критически важно для оптимизации капитального строительства и снижения экологического воздействия.

Перспективы развития метода могут быть связаны с его стандартизацией и включением в единые цифровые контуры планирования геологоразведочных и строительных работ, а также с

расширением спектра применяемых алгоритмов машинного обучения для создания самообучающихся систем прогноза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Разработка алгоритма и программного обеспечения для метода MASW выполнено при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0052.

ЛИТЕРАТУРА

Акт № 120-2017 государственной историко-культурной экспертизы земель, подлежащих воздействию хозяйственных работ в ходе строительства объектов «Поиск и оценка, получение разрешительной документации на сухоройные и гидронамывные карьеры на Кынском и Фахировском месторождениях» «Карьеры 1С и 2С» («Карьер 1С» площадь 36,7999 га; «Карьер 2С» площадь 47,6931 га), «Поиск и оценка, получение разрешительной документации на сухоройные и гидронамывные карьеры на Ново-Часельском месторождении» «Карьеры 1Ги 2Г» («Карьер 1Г» площадь 28,6338 га; «Карьер 2Г» площадь 25,1614 га) в Красноселькупском районе Ямало-Ненецкого АО в 2017 году. (2017). [Электронный ресурс]. URL: <https://nasledie89.yanao.ru/documents/active/41212/> (дата обращения: 12.12.2025).

Ахромеев Л.М. (2002). Геоморфологический словарь-справочник. Брянск, БГУ, 320 с.

Воронова И.В., Гребенюк Г.Н. (2018). Инженерно-геокриологические условия Харампурского нефтегазоконденсатного месторождения Пур-Тазовского междуречья // Геология, география и глобальная энергия, т. 69, № 2, с. 48-57.

Горяинов Н.Н. (1992). Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. Москва, Недра, 264 с.

Государственная программа Ямало-Ненецкого автономного округа «Развитие минерально-сырьевой базы на 2014–2021 годы», утверждённая постановлением Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа от 25.12.2013 № 1120-П (в ред. постановления от 19.02.2018 № 133-П). (2013). [Электронный ресурс]. URL: <https://dpr.yanao.ru/documents/active/24271/> (дата обращения: 12.12.2025).

Дергач П.А., Яблоков А.В., Зобнин Г.Ю., Белоусов А.А., Полозов С.С. (2025). Разработка портативного вибрационного источника поперечных волн для задач инженерной и рудной сейсморазведки // Сейсморазведка в Сибири и за её пределами: материалы научно-практической конференции. Красноярск, Сибирский федеральный университет, с. 37–42.

Заключение государственной экологической экспертизы проектной документации «Строительство объектов морского порта в районе пос. Сабетта на полуострове Ямал. Этап 1. Строительство объектов морского порта в районе пос. Сабетта на полуострове Ямал, обеспечивающих отгрузку продукции завода „Ямал СПГ“». (2013). [Электронный ресурс]. URL: https://rosmorport.ru/media/File/arf/eco/Zakl_eksp_22082013_529.pdf (дата обращения: 12.12.2025).

Козырев В.С., Коротков И.П., Жуков А.П. (2014). Способы учета сложно построенной верхней части разреза в Западной Сибири // Технологии сейсморазведки, №. 3, с. 66-78.

Лебедева Е.А., Файбусович Я.Э., Назаров Д.В. и др. (2020). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44 – Тазовский. Объяснительная записка. Санкт-Петербург, Минприроды России, Роснедра, ФГБУ ВСЕГЕИ, 191 с.

Методические рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных материалов. П 01-72. (1972). Ред. Гайдина А.А. Ленинград, Энергия, Ленинградское отделение, 36 с.

Миронова Р.А. (2021). Современное состояние методов исследования геокриологических процессов в массивах горных пород криолитозоны // Известия Уральского государственного горного университета, т. 64, № 4, с. 95–108, DOI: <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-95-108>.

Попов А.П., Милованов В.И., Рябов В.А., Бережной М.А. (2010). Совершенствование способа управления криогенным ресурсом основания при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений // Геотехника. Международный журнал, № 6, с. 4-22.

Семашев А.Т., Акуленко А.С., Гафаров Р.М., Сираев И.А. (2023). Перспективы повышения достоверности оценки качества полевых сейсмических данных при использовании атрибута «спектрально-взвешенное отношение «сигнал – микросейсм» // Геофизика, № 1, с. 48-53, DOI: [10.34926/geo.2023.61.78.007](https://doi.org/10.34926/geo.2023.61.78.007)

Уфимцева М.Г. (2021). Ландшафты Тюменской области: учебно-методическое пособие. Тюмень, Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 76 с.

Файбусович Я.Э., Лебедева Е.А. (2020). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (новая серия). Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44 (Тазовский). Карта полезных ископаемых / Санкт-Петербург, Роснедра, ФГБУ ВСЕГЕИ, 1 с.

Хрусталева Л.Н. (2005). Основы геотехники в криолитозоне. Москва, МГУ, 543 с.

Яблоков А.В., Камашев А.М., Моисеев М.В. (2025). Автоматизация метода анализа и инверсии поверхностных волн путем применения нейронных сетей // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти, т. 10, №1, с. 136-145, DOI: [10.51890/2587-7399-2025-10-1-136-145](https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-1-136-145).

Cracknell M. J., Reading A.M. (2014). Geological mapping using remote sensing data: A comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information // Computers & Geosciences, (63), 22-33, DOI: [10.1016/j.cageo.2013.10.022](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.022).

Davis J.C., Sampson R.J. (1986). Statistics and data analysis in geology. Wiley, New York.

Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. (2015). Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. CRC press, New York.

Kaufman L., Rousseeuw P. J. (1990). Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. John Wiley & Sons, New York.

Kodinariya T. M., Makwana P. R. (2013). Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies, 1 (6), 90–95.

Lin D., Bu Y., Liu H., Lu C., Guo S., Xu H. (2023). An experimental study of the correlation between P-wave velocity and geotechnical parameters of soils // Scientific Reports, 13 (1), DOI: [10.1038/s41598-023-48783-1](https://doi.org/10.1038/s41598-023-48783-1).

Serdyukov A.S., Yablokov A.V., Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D. (2019). Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics, 84 (1), 19–24.

Wang Z., Nur A., Shimamoto T. (2020). Prediction of acoustic wave velocities by incorporating effects of effective pressure and water saturation // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12 (6), 1161–1174, DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.08.015.

Wang Z., Sun C., Wu D. (2021). Automatic picking of multi-mode surface-wave dispersion curves based on machine learning clustering methods // *Computers & Geosciences*, 153, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104809>.

ПРИЛОЖЕНИЕ

С целью проведения сравнительного анализа построения скоростных моделей поперечной волны была выполнена дополнительная обработка данных CPP по методу MASW с помощью средств программных пакетов Echos и SeisPro. Предварительная обработка включала выделение сигнала поверхностной волны с помощью подавления других типов волн и разрежение массива 3D данных для построения псевдо-2D сейсмограмм ОПВ. Для этого были рассчитаны служебные заголовки, маркирующие ближайшие ПВ к линиям ПП и ближайшие линии ПП к ПВ в пределах каждого ПВ.

После загрузки подготовленных данных и присвоения геометрии в SeisPro были рассчитаны дисперсионные изображения в пространстве фазовая скорость – частота для каждой сейсмограммы ОПВ, по которым дисперсионные кривые пикировались в полуавтоматическом режиме. Для каждой линии ПВ выполнялась инверсия в 2D режиме с построением функции ошибки в каждой точке. В каждом пункте наблюдения, где ошибка превышала пороговое значение, выполнялась коррекция пикировки. В результате получено 153 одномерные функции $V_S(z)$ по 10 глубинным точкам (от 5 до 105 м с шагом 10 м), которые затем были интерполированы на регулярную сетку для формирования 3D куба скоростей. Путём осреднения по глубине построена карта скоростей в интервале 0-20 м, использованная далее для сопоставления с результатами автоматизированного метода MASW, описанного в основном тексте статьи (рис. 15).

Из анализа карт скоростей, полученных двумя различными подходами, а также после их сопоставления с данными ДЗЗ, следует что авторская модификация метода MASW обеспечивает существенно более высокое латеральное разрешение и геологическую согласованность. Более детальная сегментация скоростных аномалий и улучшенное совпадение границ скоростных зон с внешними геолого-геоморфологическими признаками свидетельствуют о повышенной информативности и надёжности прогноза зон распространения ОПИ, полученного с использованием модифицированного метода MASW, по сравнению со стандартным подходом.

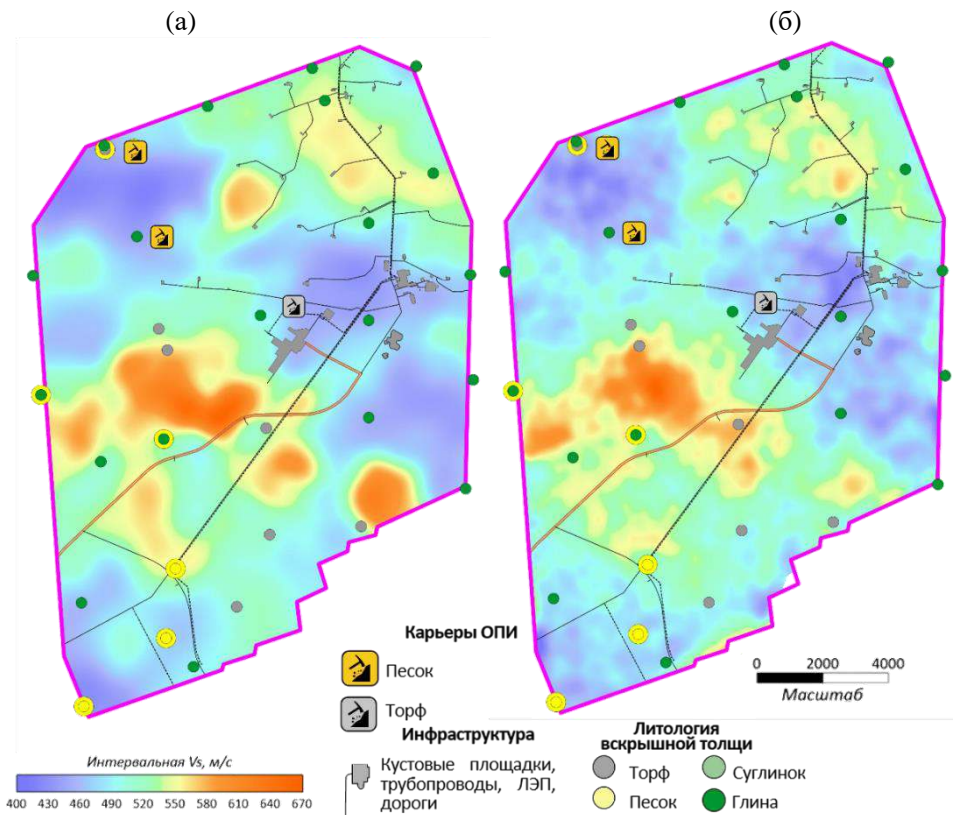


Рисунок 15. Сопоставление карт скоростей поперечной волны, полученных двумя различными подходами: с помощью средств ПО Echos и SeisPro (а) и авторской разработкой модифицированного метода MASW (б).