

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-352-360



## ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ПАЛЕОВРЕЗОВ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ АТРИБУТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ

✉ Соловьева М.А.<sup>1</sup>, Буланова И.А.<sup>1</sup>, Терёхина Я.Е.<sup>1</sup>, Щербакова Е.В.<sup>2</sup>, Понимаскин А.И.<sup>2</sup>, Горбачёв С.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО "ЦАСД МГУ", Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО "РН-Шельф-Арктика", Москва, Россия

✉ [marina-sol@yandex.ru](mailto:marina-sol@yandex.ru)

Выявление опасных геологических процессов и явлений в верхней части разреза, одним из видов которых являются палеоврезы, является важной задачей при изучении шельфовых территорий и планировании освоения морских месторождений. Также, изучение палеоврезов на шельфе Печорского моря вносит неоценимый вклад в уточнение существующих палеореконструкций данного региона в четвертичном периоде, являясь ключом к анализу колебаний уровня моря во время оледенений и разделяющих их периодов межледниковья. В рамках работы был проанализирован огромный объем сейсмических и геологических данных. Применение специализированной переобработки позволило получить высокоразрешающие сейсмические кубы и разрезы, а также наборы карт атрибутов, рассчитанных по сейсмограммам. В результате комплексного анализа всех собранных данных удалось выявить и закартировать аномалии в верхней части разреза на значительной площади шельфа Печорского моря. Была обнаружена обширная и сложно построенная сеть палеоврезов, особенности которых представлены в данной работе.

Ключевые слова: *Печорское море, палеоврезы, пра-Печора, стандартная сейсморазведка 2D/3D, специализированная обработка, атрибутный анализ, верхняя часть разреза, опасные геологические процессы*

**Введение.** Печорское море – регион повышенного интереса как для фундаментально-научных вопросов палеоклиматических реконструкций, так и со стороны практических промышленно-хозяйственных аспектов освоения шельфов. В настоящее время фокус интересов нефтегазовой индустрии устремлён на изучение арктических шельфов, в том числе, Печорского моря, которое характеризуется открытием нескольких месторождений и обнаружением ряда перспективных структур. Освоение шельфа с размещением морских нефтегазовых сооружений в сложных климатических и инженерно-геологических условиях требует детального изучения верхней части осадочного разреза с выявлением опасных геологических процессов и явлений, их анализом, оценкой степени риска и определения наиболее благоприятных участков для выполнения инженерно-строительных работ [Токарев и др., 2021]. Одним из видов геологических опасностей, широко распространённых на мелководном шельфе Печорского моря, являются палеоврезы, строение которых часто характеризуется слабой степенью консолидирования, высоким газонасыщением и наличием включений крупнообломочного материала. Такой тип отложений может оказать негативное влияние как на устойчивость буровых сооружений, так и на риски самого бурения, в связи с чем требуется картирование зон распространения палеоврезов и их учёт при установке платформ и строительстве поисково-разведочных скважин.

Не меньшей значимостью является изучение палеоврезов Печорского моря для решения научных задач. Основной особенностью четвертичной истории данного региона является влияние покровных оледенений, выраженное в периодических наступаниях и отступаниях Евразийского ледникового щита. Согласно существующим представлениям, последнее, поздне-Валдайское, оледенение не затронуло шельф Печорского моря [Svendsen et al., 2004, Hugles et al., 2016, и др.]. Однако данный регион был полностью осушен во время глубокой эвстатической регрессии Мирового Океана в позднем Валдае,

что привело к развитию обширной речной сети на данной территории [Павлидис и др., 2002]. Изучение палеоврезов на шельфе Печорского моря вносит неоценимый вклад в уточнение существующих палеореконструкций данного региона в четвертичном периоде, являясь ключом к анализу колебаний уровня моря.

**Данные и методы.** Район исследований охватывает южную и юго-восточную часть шельфа Печорского моря. В работе были использованы материалы по 7 площадям 3D и большому объему данных 2D стандартной сейсморазведки в различных частях Печорского моря (рис. 1). Для расширения возможностей интерпретации данные стандартной сейсморазведки 3D и 2D были обработаны по специальному графу, нацеленному на сохранение информации в первых сотнях метров ниже морского дна [Terekhina et al., 2016]. В ходе апробации технологии специализированной обработки было получено несколько высокоразрешающих сейсмических кубов и разрезов, рассчитаны различные амплитудные и частотные атрибуты по сейсмограммам до суммирования и суммированным кубам, а также скорости поперечных волн (обработка методом MASW). Их комплексный детальный анализ позволил выявить большое количество одиночных и формирующих обширные сети палеоврезов, прослеживающихся как на небольших глубинах (до 100 м), так и в глубоких интервалах разреза (до 1 км).

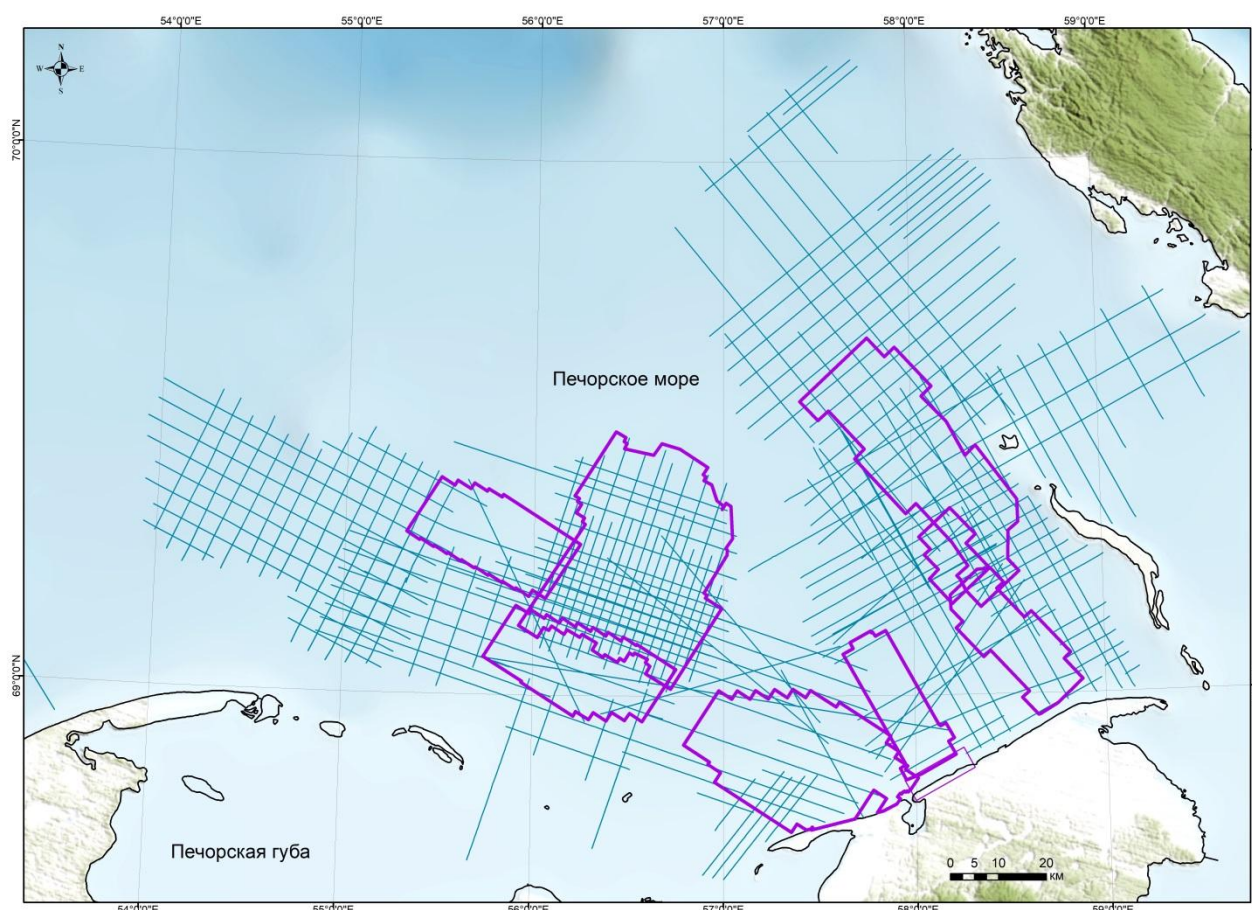


Рис. 1. Карта фактического материала. В работе использовались данные 2D (синие линии) и 3D (фиолетовые контуры) стандартной сейсморазведки после специализированной переобработки

Несмотря на существенное увеличение разрешающей способности в верхней части разреза, по сравнению со стандартной обработкой, идентификация палеоврезов на сейсмических разрезах возможна лишь для самых крупных и глубоких объектов (рис. 2). Более информативным методом обнаружения палеоврезов является анализ кубов по слайсам, а также построение карт атрибутов, рассчитанных по сейсмограммам: среднеквадратичная амплитуда, пиковая частота (соответствующая главному максимуму в

спектре), средняя частота, видимая частота (оценённая по корреляционному расстоянию), кажущаяся частота (оценённая по числу пересечений через ноль), ширина спектра. Кроме того, показательными могут быть и атрибуты, рассчитанные по суммированным данным: максимальная абсолютная амплитуда, среднеквадратичная амплитуда, когерентность и частотно-временные трансформанты (преобразование Стоквелла, спектральная декомпозиция). Комплексный анализ различных атрибутов, включая их RGB-представление и кластеризацию, упрощает процесс обнаружения палеоврезов и их детального картирования и привносит дополнительную информацию о характере заполняющих их осадков.

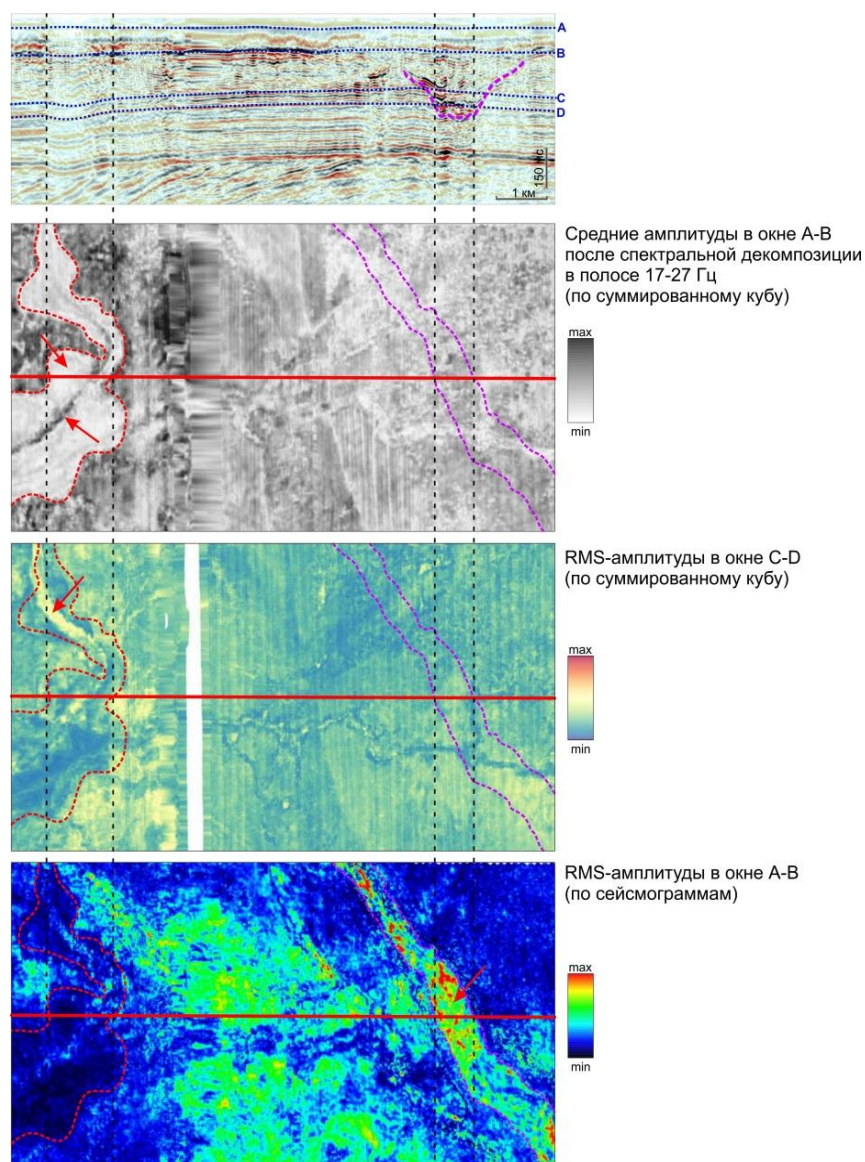


Рис. 2. Пример проявления палеоврезов приповерхностных (красный контур) и глубинных (фиолетовый контур) на разрезе и атрибутах, рассчитанных в различных окнах по суммированным и не суммированным данным. Стрелками показаны элементы, наиболее отчётливо проявляющиеся на соответствующих картах атрибутов

При интерпретации подобных данных существует ограничение в точном определении глубины залегания выявляемых объектов. К примеру, палеовреззы хорошо прослеживаются на слайсах и картах атрибутов во всём изучаемом интервале глубин, что делает практически не возможным определение положения их тальвегов (рис. 3). В связи с этим для верификации выявленных опасностей и уточнения глубины их залегания на отдельных



площадках привлекались материалы инженерных изысканий (сейсморазведка высокого и сверхвысокого разрешения, непрерывное сейсмоакустическое профилирование).

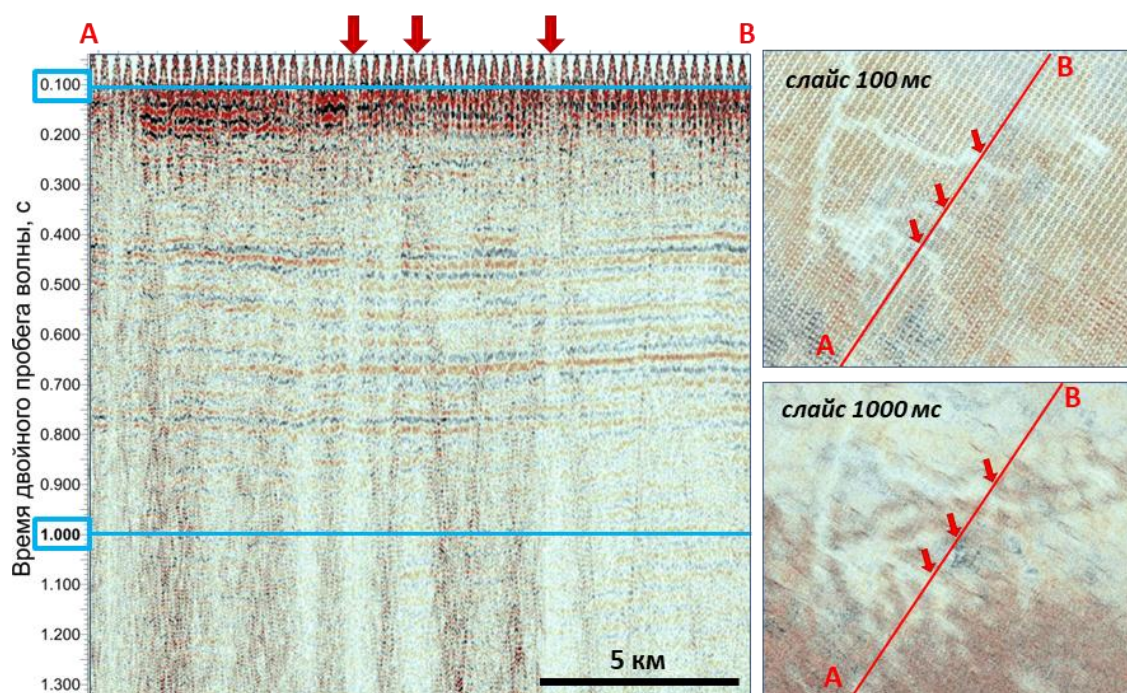


Рис. 3. Пример проявления палеоврезов (показаны красными стрелками) на амплитудном разрезе куба после специализированной обработки (слева) и на амплитудных слайсах на уровнях 100 и 1000 мс

**Результаты наблюдений.** Район исследований охватывает практически всю южную и юго-восточную часть шельфа Печорского моря от п-ова Русский Заворот до о-ва Долгий с глубинами моря от первых метров до 50 м. Полное осушение данного региона во время глубокой эвстатической регрессии Мирового Океана в позднем Валдае [Павлидис и др., 2002] привело к развитию обширной речной сети. Существующие свидетельства говорят о развитии крупной палеодолины пра-Печоры, которая прослеживается из Печорской губы в направлении Карских ворот, меняя своё направления с восточного на северо-восточное в районе о-ва Песяков [Павлидис и др., 2002]. Однако имеющиеся представления о морфологии долины носят приближённый характер, а сведения о наличии других палеоврезов весьма разрознены и неполные. В связи с этим, в данной работе была поставлена задача уточнения морфологии палеодолины пра-Печоры, а также выявления новых объектов, их картирование, анализ морфологии и внутреннего строения.

В пределах исследуемой площади наиболее крупные системы палеоврезов обнаружены в верхней части разреза (до глубин 100 м). Они отчётливо прослеживаются практически на всех картах атрибутов, рассчитанных по сейсмограммам, а также на слайсах кубов после спектральной декомпозиции и картах скоростей поперечных волн, оцененных методом MASW. Выявленные системы палеоврезов всегда характеризуются низкими значениями скоростей поперечных волн. На амплитудных картах системы палеоврезов иногда различаются по своим характеристикам – некоторые системы проявляются в виде областей пониженных амплитуд, в то время как другие системы палеоврезов характеризуется повышением амплитуд. Также, системы иногда отличаются и при анализе данных после частотно-временных преобразованиях: на разных частотах системы могут проявляться по-разному. Аналогично, на RGB-представлении видно, что палеоврезы характеризуются различными цветовыми оттенками (рис. 4). Все эти наблюдения позволяют сделать вывод о различиях в глубине залегания данных врезов и/или мощности заполняющих их осадков.

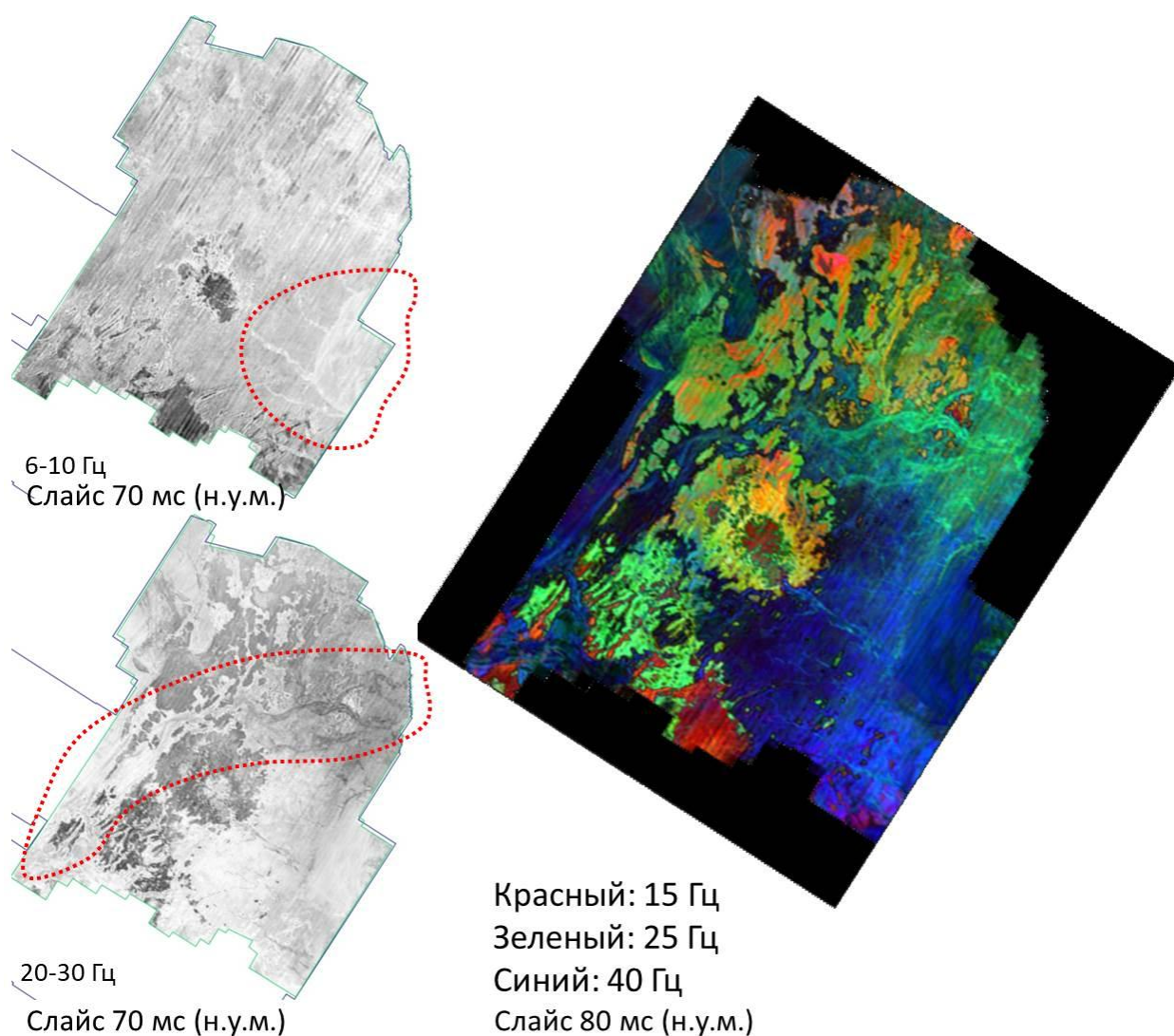


Рис. 4. Проявление палеоврезов (указаны красным пунктиром) на слайсах куба после спектральной декомпозиции (слева) и на RGB-представлении (справа)

Палеоврезы, залегающие на глубине более 100 м характеризуются менее сложной формой в плане и отсутствием большого количества разветвлённых притоков. Кроме того, они, как правило, отчётливо определяются и на разрезах, и на картах атрибутов после суммирования или горизонтальных слайсах. На разрезах можно проследить внутреннее строение данных объектов и их изменение по мере удаления от суши: могут меняться ширина вреза, положение тальвега, проявление кинематических эффектов ниже подошвы, наличие нескольких генераций (рис. 5). Иногда к тальвегам врезом приурочены ярко выраженные амплитудные аномалии, возможно связанные с газонасыщенными отложениями.

**Обсуждение результатов.** В результате детального изучения сейсморазведочных материалов была закартирована обширная система палеоврезов, большая часть из которых сосредоточена в интервале неоген-четвертичных отложений. Лишь наиболее крупные врезы затрагивают разрез юрско-меловых комплексов.

Наиболее отчётливо выделяется сеть широких палеоврезов, веерообразно расходящихся в северном и восточном направлениях в районе островов Гуляевские Кошки, располагаясь на продолжении современного устья Печоры [Соловьева и др., 2023]. Существуют представления [Павлидис и др., 2002; Павлидис и др., 2007], что на данном участке в поздне-валдайское время развивалась древняя гидросеть пра-Печоры. Её наиболее крупная палеодолина прослеживалась из Печорской губы в восточном



направлении до о-ва Песяков, где затем меняла своё направление на северо-восточное (рис.6, чёрный пунктир). Новые данные демонстрируют, что строение палеодолины пра-Печоры сложнее, чем представлялось раньше. Согласно полученным результатам, основное русло располагается северо-западнее от предполагаемой траектории и осложнено меандрами и многочисленными притоками разного масштаба.

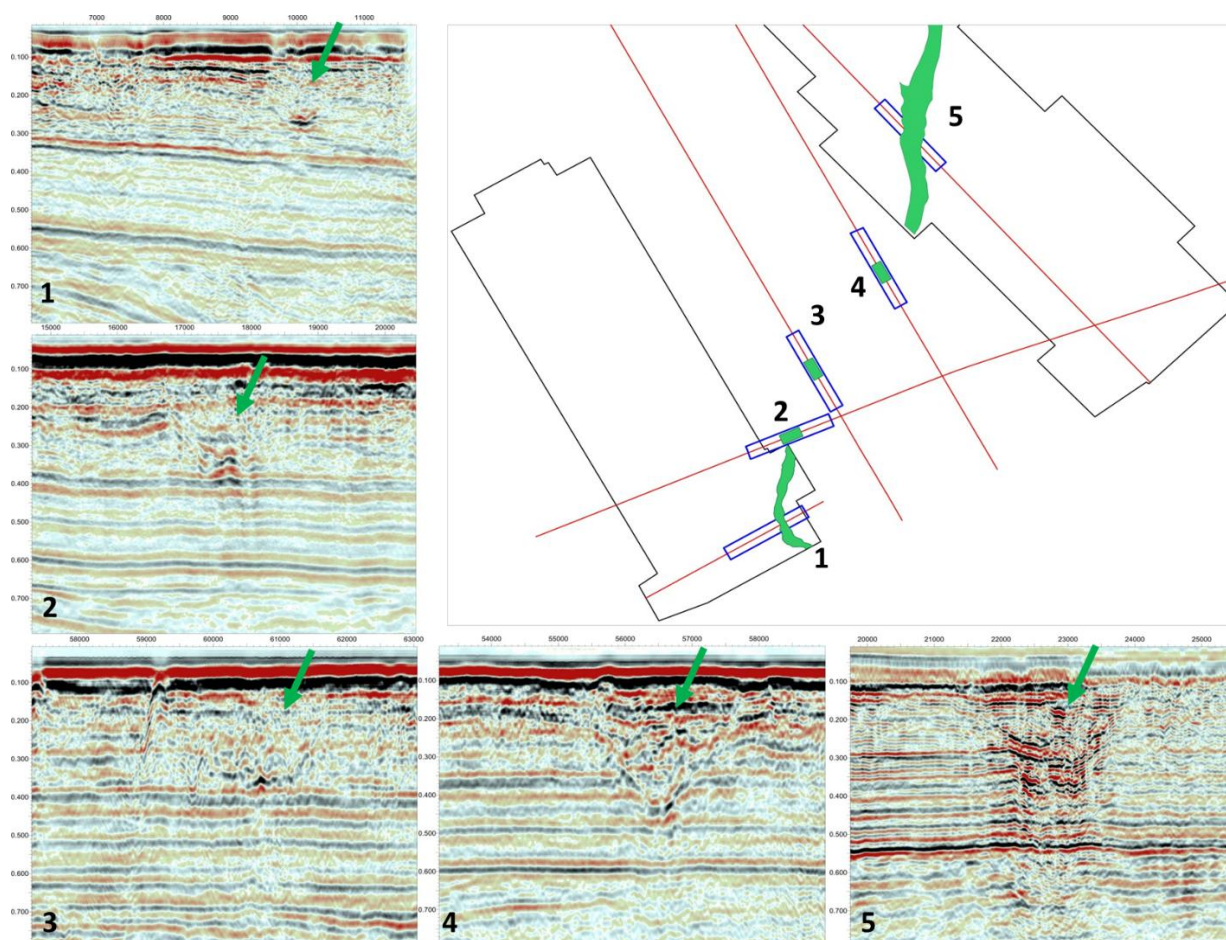


Рис. 5. Выделение крупного палеовреза (показан зелеными стрелками на разрезах и заливкой на схеме) на данных 2D и 3D сейсморазведочных работ после специализированной переработки

На этом же участке, расположенном к северу от о-вов Гуляевские Кошки, прослеживается более глубокая и древняя сеть палеоврезов, развивавшаяся в мезозойское время и залегающая в современном разрезе на глубине более 500 м под дном. Интересно отметить пространственное совпадение некоторых элементов гидросети с положением пра-Печоры, однако их ориентация преимущественно северной направленности. Их обнаружение свидетельствует о том, что речные сети на данной территории развивались неоднократно.

Ещё одна крупная сеть палеоврезов обнаружена напротив Варандейской губы и п-ва Мединский Заворот. Их ширина существенно меньше, чем у пра-Печоры, не превышая 1.5 км в самых широких частях. Продолжая успешный опыт выполнения инверсии по поверхностным волнам данных MASW на акватории Печорского моря для изучения особенностей приповерхностного интервала разреза [Половков и др., 2024, Титов и др., 2021], на этой площади были проведены подобные работы, результаты которых позволили более точно определить глубину залегания некоторых палеоврезов. Установлены группы палеоврезов, прослеживающиеся на глубинах 5-20 м, 10-40 м и 10-50 м ниже поверхности дна. Ориентация выявленных групп объектов существенно отличается, вплоть до 90 градусов, что может свидетельствовать о довольно быстрой перестройке речной сети в четвертичное время. Возможно, это связано с изостатическими колебаниями и

неравномерного темпа трансгрессии в голоцене, что подтверждается наличием серии террас на разных глубинах, маркирующих хронологию затопления ранее осушенного дна Печорского моря [Павлидис и др., 2007].

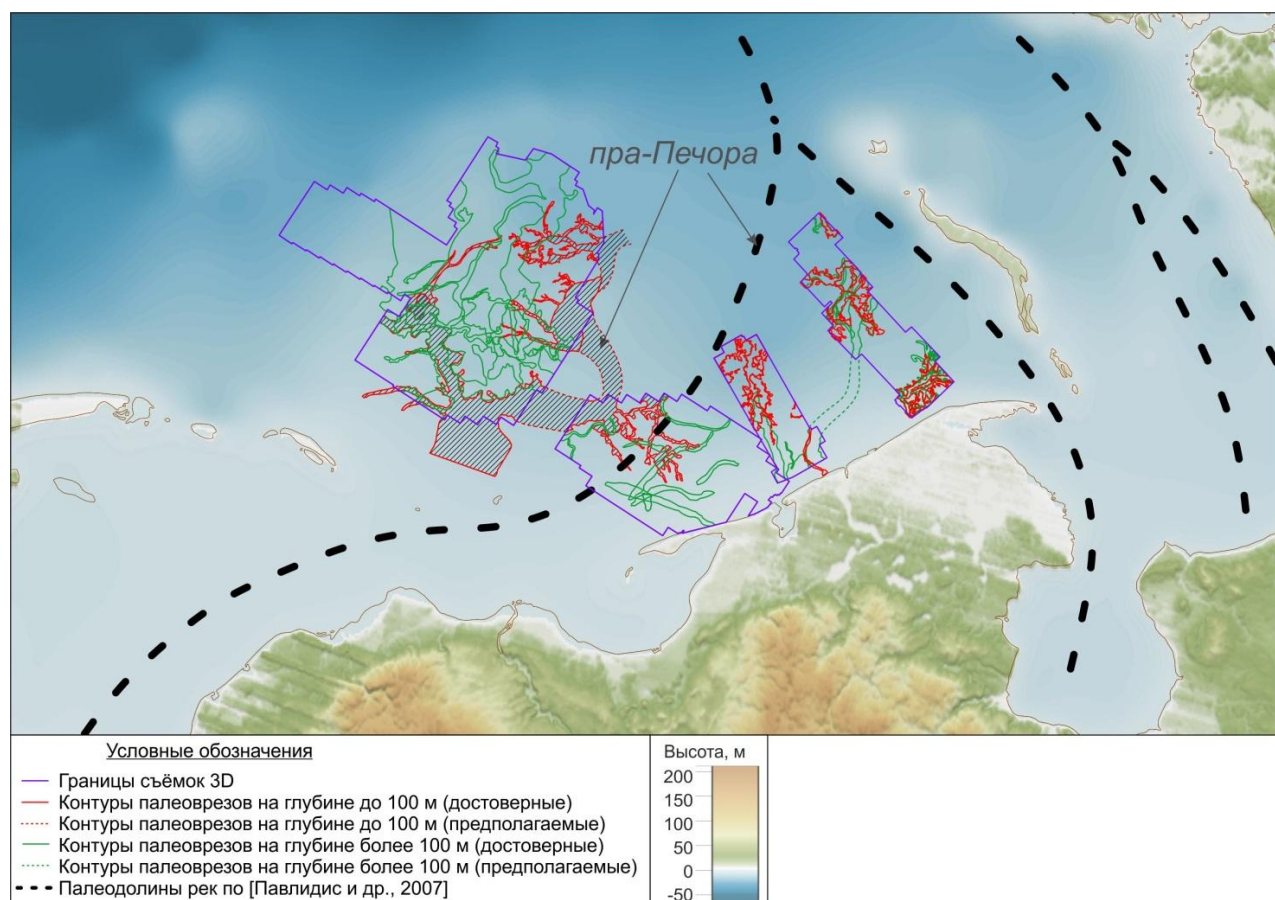


Рис. 6. Сопоставление контура русла пра-Печоры, выявленного в результате данной работы, с существовавшими ранее представлениями (по [Павлидис и др., 2007]) и распространение других палеоврезов в интервалах глубин 0-100 и 100-1000 м. Наклонной штриховкой показано предполагаемое русло пра-Печоры

По результатам атрибутивного анализа удалось также установить некоторые особенности отложений, заполняющих палеоврезы. В тальвеговых частях выявленных палеорусел широко распространены газонасыщенные осадки, которые уверенно идентифицируются по высокоамплитудным аномалиям типа «яркое пятно», повышению значений атрибута «псевдопоглощение», а также наличию отрицательного скоростного эффекта под аномалией. Скоростной анализ показал, что в пределах палеоврезов отчётливо выявляются области низких значений скоростей поперечных волн. Это может свидетельствовать о заполнении врезов разуплотнёнными, слабоконсолированными отложениями.

Таким образом, комплексный анализ различных атрибутов, седиментационных слайсов и сейсмических разрезов позволяет установить не только конфигурацию палеоврезов в плане, но и определить некоторые особенности слагающих их отложений.

**Заключение.** Специализированная обработка и интерпретация данных 2D и 3D стандартной сейсморазведки является эффективным инструментом для выявления областей распространения различных опасных геологических процессов и явлений на большой территории, в том числе, палеоврезов. Наиболее информативным методом является использование атрибутов, рассчитанных по сейсмограммам сейсмических кубов, которые позволяют выявлять палеоврезы даже незначительных размеров (первые десятки

метров в ширину) и сложной конфигурации, а также определять особенности заполняющих их осадков.

В результате данного исследования выявлено несколько крупных систем палеоврезов, прослеживающихся как в приповерхностном интервале разреза, так и на больших глубинах. Сложная конфигурация палеоврезов, различия в их мощности и глубине залегания, разная направленность и пересечение объектов в плане свидетельствует о длительном и сложном развитии гидросети с неоднократной перестройкой русловых комплексов во время периодических регрессий и трансгрессий Печорского моря. Главным агентом речной эрозии на данной территории в четвертичное время являлась пра-Печора, морфология русла которой была значительно уточнена по сравнению с предыдущими представлениями. Однако наиболее крупные и глубокие палеоврезы могут иметь флювиогляциальный генезис, сформировавшись в более ранние ледниковые эпохи.

Разработанная и успешно апробированная технология специализированной обработки и интерпретации данных стандартной сейсморазведки позволяет эффективно изучать верхнюю часть осадочного разреза и выявлять различные геологические объекты, в том числе, палеоврезы, на значительных территориях. Представленная методика открывает широкие перспективы к изучению других шельфовых акваторий как для решения научных задач по картированию и анализу проявлений различных геологических процессов, так и для оценки геологических условий при освоении месторождений.

#### ЛИТЕРАТУРА

*Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л., Дунаев Н.Н., Артемьев А.В.* Подводные террасы Печорского моря // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 6. С. 894–901.

*Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л., Огородов С.А., Тарасов Г.А.* Печорское море: прошлое, настоящее, будущее // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 6. С. 927–939.

*Соловьева М.А., Терёхина Я.Е., Хлебникова О.А., Горбачев С.В., Нурмухамедов Т.В.* Обнаружение подводного русла Пра-Печоры на основе специализированной интерпретации данных стандартной сейсморазведки 3D // *Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)»*. 2023. Том IV. С. 87–90.

*Половков В.В., Терёхина Я.Е., Рахимов Э.А., Кудинов А.А., Пономаренко А.В., Соловьева М.А., Буланова И.А., Токарев М.Ю., Горбачев С.В.* Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных при сейсморазведочных работах 3D МОВ-ОГТ с буксируемым оборудованием, с целью изучения строения верхней части разреза шельфа Печорского моря // *Геофизика*. 2024. № 2. С. 52–57. doi: 10.34926/geo.2024.42.23.009

*Титов Н.О., Токарев М.Ю., Горбачев С.В.* Анализ поверхностных волн для идентификации опасных геологических процессов по данным трехмерных сейсмических наблюдений на шельфе Печорского моря // *Геофизика*. 2021. № 6. С. 120–125.

*Токарев М.Ю., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е., Бирюков Е.А., Колубакин А.А., Горбачев С.В.* Перспективные сейсмические технологии для инженерно-геологических изысканий на мелководном шельфе // *Геофизика. Спецвыпуск*. 2021. С. 3–11.

*Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø. S., Mangerud J., Svendsen J.* The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction // *Boreas*. 2016. Vol. 45. Is. 1. P. 1–45. doi: 10.1111/bor.12142

*Svendsen J., Alexanderson H., Astakhov V., Demidov I., Dowdeswell J., Funder S., Gataullin, V., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Hubberten H.-W., Ingólfsson Ó., Jakobsson M., Kjaer K., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J., Lyså A., Mangerud J., Stein R.* Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. Is.11-13. P. 1229-1271. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008

*Terekhina Y.E., Gorbachev S.V., Maev P.A., Ponimaskin A.I.* A possibility of using standard 3D seismic data for assessment of drilling geohazards in transit zone // *Near Surface Geoscience*



2016 - Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference. EAGE Publications, 2016. doi: 10.3997/2214-4609.201602144

## **FEATURES OF PALEOCHANNEL SYSTEMS OF THE PECHORA SEA BASED ON ATTRIBUTE ANALYSIS OF SEISMIC DATA**

*Solovyeva M.A.<sup>1</sup>, Bulanova I.A.<sup>1</sup>, Terekhina Ya.E.<sup>1</sup>, Shcherbakova E.V.<sup>2</sup>, Ponimaskin A.I.<sup>2</sup>  
Gorbachev S.V.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> LLC "MSU Seismic Data Analysis Center", Moscow, Russia

<sup>3</sup> LLC "RN-Shelf-Arktika", Moscow, Russia

Identification of geohazard, including paleochannels, in the upper part of the sedimentary section is an important purpose of the offshore development. Also the study of paleochannels on the Pechora Sea shelf makes an invaluable contribution to clarifying the existing paleoclimate reconstructions of this region in the Quaternary, because it is the key to analyzing sea level fluctuations during glaciations and the interglacial periods. A huge volume of seismic and geological data was analyzed in the framework of this study. High-resolution seismic cubes and sections and sets of attribute maps calculated from seismograms were obtained after the specialized reprocessing. The results of complex analysis of all processed data allow us to detect geohazards in the upper part of the sedimentary section on a significant part of the Pechora Sea shelf. A huge and complex network of paleochannels was discovered, the features of which are presented in this study

Keywords: *Pechora Sea, paleochannels, pra-Pechora, standard 2D/3D seismic survey, specialized processing, attribute analysis, the upper part of the sedimentary section, geohazard*

### **REFERENCES:**

- Pavlidis Yu.A., Nikiforov S.L., Dunayev N.N., Artemyev A.V.* Underwater terraces of the Pechora Sea // *Oceanology*. 2002. T. 42. № 6. C. 894-901. (in Russian)
- Pavlidis Yu.A., Nikiforov S.L., Ogorodov S.A., Tarasov G.A.* Pechora Sea: past, present, future // *Oceanology*. 2007. T. 47. № 6. C. 927-939. (in Russian)
- Solovyeva M.A., Terekhina Ya.E., Khlebnikova O.A., Gorbachev S.V., Nurmukhamedov T. V.* Discovery of the underwater channel of the Paleo-Pechora based on specialized interpretation of standard 3D seismic data// Conference proceedings XII International conference «Marine Research and Education» (MARESEDU-2023)». Volume IV. C. 87–90.
- Polovkov V.V., Terekhina Ya.E., Rakhimov E.A., Kudinov A.A., Ponomarenko A.V., Solovyeva M.A., Bulanova I.A., Tokarev M.Yu., Gorbachev S.V.* Methodology for processing surface waves recorded during 3d seismic surveys with towed equipment to study the structure of the upper part of the shelf section of the Pechora sea// *Geophysics*. 2024. № 2. C. 52–57. doi: 10.34926/geo.2024.42.23.009
- Titov N.O., Tokarev M.Yu., Gorbachev S.V.* Analysis of surface waves for identification of geological hazards based on the data of 3D seismic observations on the Pechora Sea shelf // *Geophysics*. 2021. № 6. C. 120-125. (in Russian)
- Tokarev M.Yu., Roslyakov A.G., Terekhina Y.E., Biryukov E.A., Kolyubakin A.A., Gorbachev S.V.* Perspective seismic technologies for engineering-geological surveys on the shallow shelf // *Geophysics*. Special Issue. 2021. C. 3-11. (in Russian)
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø. S., Mangerud J., Svendsen J.* The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction // *Boreas*. 2016. Vol. 45. Is. 1. P. 1–45. doi: 10.1111/bor.12142
- Svendsen J., Alexanderson H., Astakhov V., Demidov I., Dowdeswell J., Funder S., Gataullin, V., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Hubberten H.-W., Ingólfsson Ó., Jakobsson M., Kjaer K., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J., Lyså A., Mangerud J., Stein R.* Late Quaternary ice sheet history of Northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*. 2004. Vol. 23. Is.11-13. P. 1229-1271. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008
- Terekhina Y.E., Gorbachev S.V., Maev P.A., Ponimaskin A.I.* A possibility of using standard 3D seismic data for assessment of drilling geohazards in transit zone // *Near Surface Geoscience 2016 - Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. EAGE Publications, 2016. doi: 10.3997/2214-4609.201602144