

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПРИЗНАКАХ МАКСИМАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДНЕГО ОЛЕДЕНЕНИЯ В АКВАТОРИИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

¹Хлебникова О.А., ²Репкина Т.Ю., ¹Терехина Я.Е., ³Соловьева М.А., ⁴Рыбалко А.Е.,
⁵Колюбакин А.А.

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт Географии РАН, Москва, Россия

³ООО «Деко-Геофизика», Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵ООО «РН-Эксплорейшн», Москва, Россия

Проблема положения южной границы Баренцевоморского ледникового щита - один из дискуссионных вопросов палеогеографии региона. В работе обобщены опубликованные данные о распространении на шельфе Печорского моря эрозионно-аккумулятивных геологических образований, характерных для ледниковых и перигляциальных шельфов. На основе интерпретации данных стандартных сейсморазведочных работ 2D и 3D реконструирована сеть палеоврезов, которая может быть сопоставлена с долиной Пра-Печоры. Уточнены границы распространения многолетнемерзлых пород. Приведены свидетельства, что во время последнего ледникового максимума граница оледенения находилась в районе «линии Колгуева», а на прибрежном мелководье существовали перигляциальные условия.

Ключевые слова: *Печорское море, рельеф, валдайское оледенение, многолетнемерзлые породы, Пра-Печора*

Введение. Печорское море – мелководный бассейн с глубинами, постепенно увеличивающимися от материкового берега к северу. Большая часть его дна представляет собой сочетание слабо расчлененных субгоризонтальных и пологонаклонных аккумулятивных равнин. Региональные батиметрические карты и цифровые модели рельефа [Jakobsson, Larry, 2022, Государственная..., 2013] дают представление о наиболее общих закономерностях строения рельефа дна, что оставляет неопределенность при палеогеографических реконструкциях. Существуют модели, предполагающие, что во время последнего ледникового максимума шельф Печорского моря: был осушен и находился в перигляциальных условиях [Арктический..., 1987, Крапивнер, 2006 и др.]; был полностью [Svendsen et al., 2004] или частично [Gatoulin et al., 2001, Hughes, 2016 и др.] перекрыт Баренцевоморским ледниковым щитом. В последние годы наиболее вероятным представляется положение южной границы щита вблизи бровки мелководной части шельфа, в районе так называемой «линии Колгуева» (Рис. 1). Появление новых данных о формах рельефа, характерных для ледниковых и/или перигляциальных шельфов, полученных с помощью геофизических методов высокого разрешения [Мороз и др., 2020 а, б; Еременко и др., 2021] и новых методик интерпретации геофизических данных [Terekhina et al., 2015, Terekhina et al., 2016], позволяет уточнить существующие модели.

Анализ существующих материалов. На Рис. 1 обобщены данные о положении форм мезо- и микрорельефа (по классификации [Никифоров и др., 2007]) шельфа Печорского моря, полученные из разных источников. Формы мезорельефа (протяженные моренные гряды, ложбины) выделены по батиметрическим и морфометрическим картам, построенные по ЦМР морского дна [Кошель и др., 2014]; часть моренных гряд переведена по результатам по данным НСП [Gatoulin et al., 2001]. Положение форм рельефа и явлений флюидогенной, криогенной и посткриогенной природы приведено по опубликованным данным [Бондарев и др., 2002; Рокос, 2009, Мороз и др., 2020 а, б; Еременко и др., 2021].

Новые данные о распространении на Печорском мелководье форм эрозионного, криогенного и флюидогенного происхождения получены в результате интерпретации геофизических данных (Рис. 1, 2).

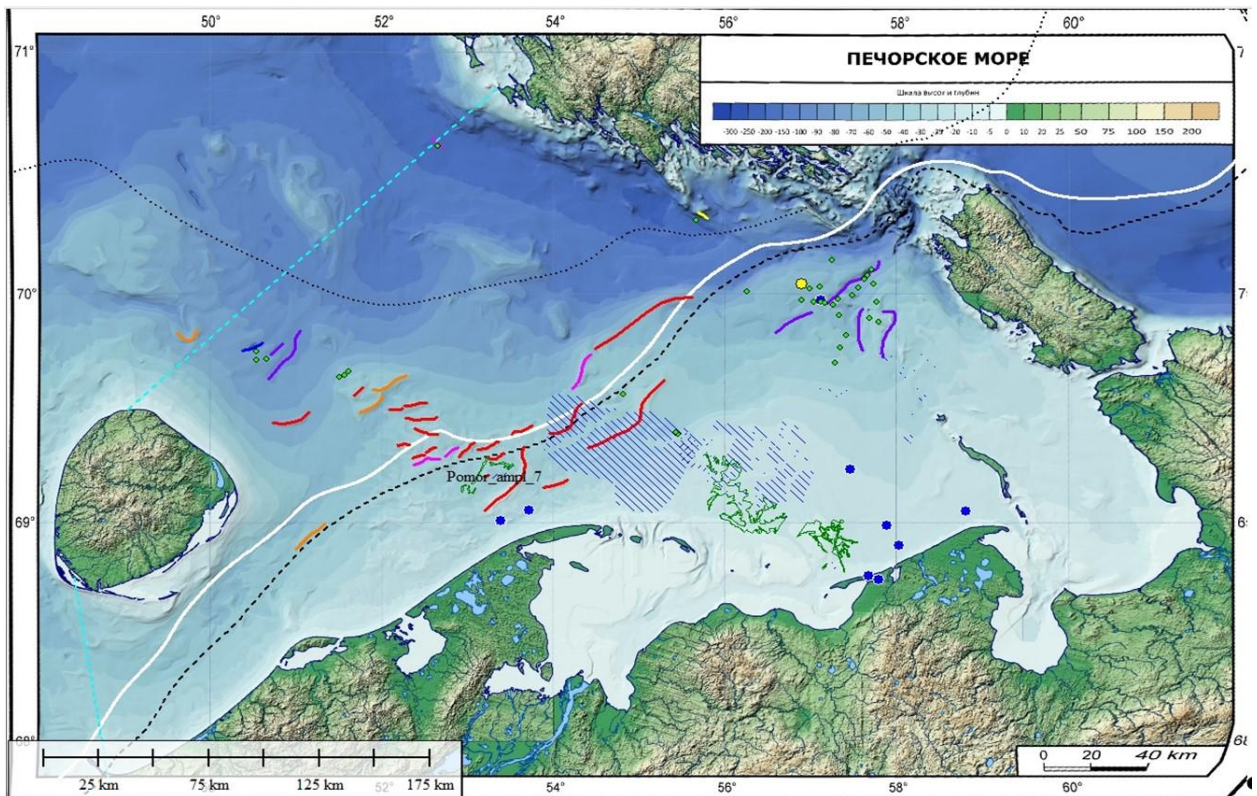


Рис. 1 Эрозионно-аккумулятивные геологические образования на шельфе Печорского моря.

Основа – батиметрическая карта Печорского моря [Кошель и др., 2014].

Условные обозначения: белая сплошная линия – наиболее вероятная граница Баренцегоморского ледникового щита во время последнего ледникового максимума (~20 тыс. кал.л.н.) [Hughes, 2016], черный мелкий и крупный пунктир – менее вероятные варианты границ ледника [Hughes, 2016].

Ледниковые аккумулятивные образования: 1) оранжевые линии – гряды предположительного ледникового генезиса, выделенные по батиметрическим данным [по Кошель и др., 2014]; 2) красные линии – моренные гряды, выделенные по батиметрическим картам и интерпретации профилей НСП [по Gattaulin et al., 2001]; 3) розовые линии – ледниковые гряды, выделенные по батиметрическим картам и данным съемки МЛЭ и профилографом [Мороз и др., 2020а,б; Еременко и др., 2021];

Флювиальные эрозионно-аккумулятивные образования: 1) фиолетовые линии – палеоврезы, выделенные по батиметрической карте [по Кошель и др., 2014]; 2) синие линии – палеоврезы, подтвержденные геофизическими данными [Мороз и др., 2020а].

Аллювиальные эрозионно-аккумулятивные образования: зеленый контур – погребенные речные долины, выделенные по 2D и 3D сейсмическим данным (см. Рис. 2).

Флюидогенные денудационно-аккумулятивные образования: 1) зеленые точки – покмарки, выделенные по данным МЛЭ [Мороз и др., 2020а,б; Еременко и др., 2021], и выходы газов [Мороз и др., 2020б]; 2) желтая точка – пингообразные структуры по [Бондарев и др., 2002; Рокос, 2009].
Дополнительные обозначения: штриховка синяя – ареалы развития газонасыщенные осадков; синие точки – положение скважин, вскрывших ММП по [Бондарев и др., 2002; Рокос, 2009]; голубой пунктир – условные границы Печорского моря.

Результаты анализа данных сейсморазведки. За последнее десятилетие на акватории Печорского моря отснят большой объем данных стандартных сейсморазведочных работ (СР) 2D и 3D, покрывающие основные выявленные структуры Печорского моря. Малая глубина акватории и низкий частотный состав стандартной сейсморазведки накладывают ограничения на использование данных 2D/3D СР для решения инженерно-геологических задач [Terekhina et al., 2015]. Для расширения возможностей интерпретации данные сейсморазведки были обработаны по специально

разработанному графу, нацеленному на сохранение информации в первых сотнях метров ниже морского дна [Terekhina et al., 2016].

Классические алгоритмы интерпретации в данной задаче недостаточно эффективны, что привело к разработке нового подхода к анализу геофизических данных, их сопоставлению и комплексированию с выдачей обоснованных результатов с использованием данных разного типа. Например, производился расчет амплитудных и частотных атрибутов по несуммированным данным. Этот приём показал высокую эффективность для выявления различных геологических аномалий и ранжирования опасностей, в том числе палеорусел, приповерхностного газа и других объектов. Особое внимание в работе уделяется идентификации и верификации обнаруженных геологических особенностей на данных 3D/2D с архивными инженерно-геофизическими данными: сейсмическими и сейсмоакустическими материалами (СВР, ССВР, СУВР и ВЧ НСАП).

В ходе интерпретации как суммированных 2D/3D данных, так и атрибутов, рассчитанных по сейсмограммам, удалось обнаружить множество фрагментов палеоврезов, охарактеризовать их и с высокой точностью оконтурить. При этом, на сейсмических разрезах эти объекты достаточно сложно выявить в связи с низким вертикальным разрешением записи и особенностью систем наблюдений (отсутствием ближних удалений). Региональный масштаб исследования позволил проследить их на большой площади и объединить в крупную сеть палеоврезов, продолжающую русло современной Печоры, что при детальном работах на отдельных площадках ИГИ невозможно.

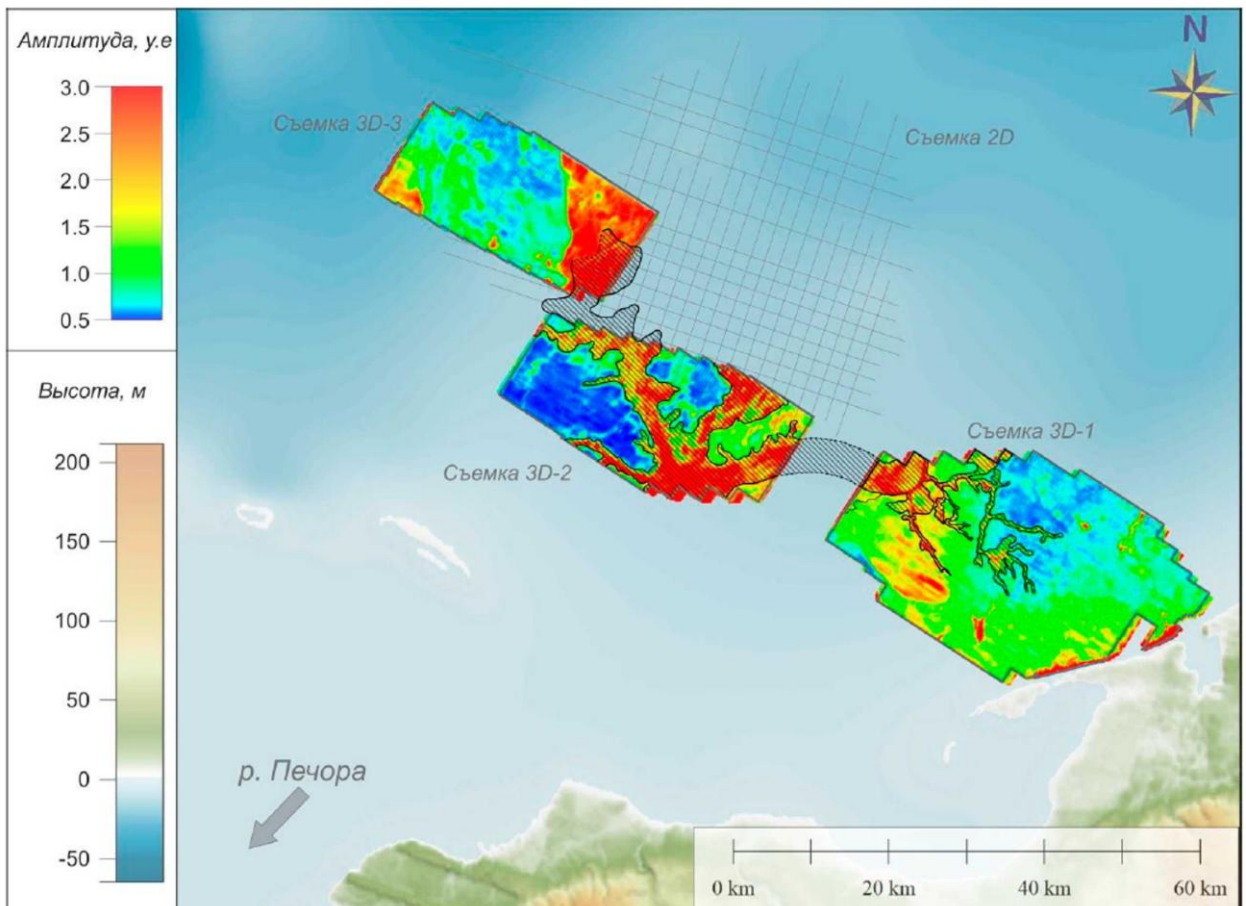


Рис. 2. Положение эрозионной сети, выявленной при интерпретации данных сейсморазведки 2D и атрибутов, рассчитанных по данным по 3D

Районирование форм ледникового и перигляциального рельефа. Ледниковая морфоскульптура представлена комплексом аккумулятивных и эрозионных форм. Наиболее крупны гряды, идентифицированные по морфологическим признакам как краевые ледниковые образования, развиты на глубинах 30-70 м. На глубинах 35-55 м их наличие и морфология подтверждены геофизическими исследованиями [Gattaulin et al., 2001; Мороз и др., 2020 а, б]. По батиметрическим картам средних масштабов [Кошель и др., 2014] протяженность отдельных гряд варьирует от ~2 до ~51 км, ширина - от ~2 до ~10 км, а высота - от 5 до 10 м. На участках МЛЭ показано, что гряды ассиметричны (северо-западные склоны круче юго-восточных) с уклонами склонов до 15о и неровным грядовым рельефом [Мороз и др., 2021а,б].

Пояс гряд (ширина 10-40 км) окаймляет перегиб от мелководного к более глубоководному шельфу слабо изогнутой к югу дугой; ее положение близко к «линии Колгуева» [Gattaulin et al., 2001]. Гряды отчетливо прослеживаются от северной оконечности о. Колгуева до долготы мыса Русский Заворот. Восточнее они становятся ниже, тяготеют к ЮЮЗ склону Южно-Новоземельского желоба и большим (60-90 м) глубинам.

Вторая ветвь краевых образований протягивается на глубинах 40-45 м вдоль ЮВ склона Поморского пролива. Положение отдельных гряд подтверждено данными НСП [Gattaulin et al., 2001]. По мнению [Hughes et al., 2016] именно эта ветвь гряд является южной границей продвижения последнего ледника.

На днище Южно-Новоземельского желоба [Еременко и др., 2021] и на восточном склоне краевой моренной гряды в пределах «линии Колгуева» [Мороз и др., 2020б] зафиксированы флютинг-морены – гряды с извилистыми или неровными очертаниями протяженностью от первых сотен метров до 3-4 км при ширине 100-300 м и относительной высоте 1.5-5 м.

На склонах структурных депрессий – Гусиного желоба и пролива Карские Ворота на глубинах 70-85 и 35-60 м соответственно выделены врезы с протяженностью 7-32 км и относительной глубиной до 10 м. На южном борту Гусиного желоба врезы почти параллельны друг другу, а на западном склоне депрессии пролива Карские Ворота – извилистые, с неровным продольным профилем, иногда резко прерываются. Вероятно, как и серия врезов на склонах Гусиного и Канинских плато [Bjarnadóttir et al., 2016], они могут быть отнесены к подледниковым каналам стока. Однако, детальные данные об их строении единичны.

Формы рельефа, геологические образования и явления, характерные для перигляциальных шельфов, представлены погребенными речными долинами, а также формами криогенного и посткриогенного происхождения.

Погребенные речные долины, выделенные по данным анализа 2D и 3D сейсмических данных, образуют фрагменты эрозионной сети с характерным древовидным рисунком (Рис. 2). Наиболее крупный палеоврез имеет сложные очертания, протяженность ~40 км при ширине 4-8 км. Вероятно, сеть палеоврезов может быть сопоставлена с долиной Пра-Печоры и ее притоками. Древовидный рисунок имеет также врез, протягивающийся от о. Песякова к СЗ, в сторону «Пра-Печоры». Однако ориентировка погребенных врезов не позволяет однозначно интерпретировать направление стока реки.

Пингообразные структуры отчетливо выражены в рельефе дна. Их наличие связывают с высокой газонасыщенностью отложений и мелкозалегающей зоны аномально высокого пластового давления, которые образовались, вероятно, при деградации ММП [Рокос, 2009].

Наличие ММП на мелководном шельфе доказано бурением (Рис. 1) [Бондарев и др., 2002, Рокос и др., 2009].

Закключение. Таким образом, в северной части Печорского моря встречаются формы рельефа ледникового генезиса: краевые моренные гряды, флютинг-морены, подледниковые каналы стока. В южной части распространены формы рельефа, характерные для перигляциальных областей: погребенные речные долины, пиногообразные структуры, покмарки, многолетнемерзлые породы. Конфигурация ледникового щита во время ледникового максимума в районе Печорского моря является остро дискуссионным вопросом. По описанным данным выделяются моренные гряды южнее линий, представленных в наиболее распространённых моделях [например, *Hughes, 2016; Patton et al., 2017; Svendsen et al., 2004*], что позволяет существенно уточнить границу максимального распространения четвертичного оледенения.

ЛИТЕРАТУРА

Арктический шельф Евразии в позднечетвертичное время / Аксенов А.А., Дунаев Н.Н., Ионии А.С. и др. М.: Наука, 1987, 278 с.

Еременко Е.А., Денисова А.П., Мороз Е.А., Мазнев С.В., Архипов В.В. Рельефообразующая роль дегазации на Баренцево-Карском шельфе // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. №8. С. 73-81.

Кошель С.М., Кошель А.М., Ушакова Л. Картографирование рельефа дна северных морей России с использованием цифровых моделей. Интер-Карто/ИнтерГИС-20: Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Материалы международной конференции, Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда) и Найроби (Кения), 23 июля-8 августа 2014 г. Издательство Константа Белгород, 2014, С. 417-423.

Кративнер Р.Б. Быстрое погружение Баренцево-Карского шельфа // Геотектоника. 2006. № 3. С. 39-51.

Мороз Е.А., Кохан А.В., Зарайская Ю.А., Соколов С.Ю., Разумовский А.А. Строение рельефа и динамика движения ледниковых масс краевой зоны позднеплейстоценового ледника в Баренцевоморском регионе // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Москва, 28 сентября-1 октября 2020 г. М., 2020, С. 713-718.

Мороз Е.А., Кохан А.В., Зарайская Ю.А., Сухих Е.А., Разумовский А.А., Ананьев Р.А. Рельеф дна и поздневалдайское оледенение юго-восточной части Баренцева моря // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» Том II (III). Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020б, С. 114-117.

Никифоров С.Л., Островский Д.Б., Павлидис Ю.Д., Селезнев И.А. История развития рельефа шельфа Арктики и создание цифровой модели морского дна // Подводные исследования и робототехника. 2007. 1 (3). С. 66-75.

Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С., Костин Д.А., Куликов С.Н. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. №10. С. 38-41.

Романкевич Е.А., Лисицин А.П., Виноградов М.Е. Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социоэкономические проблемы). М.: Изд-во «МОРЕ». 2003, 486 с.

Bjarnadóttir L.R., Winsborrow M.C.M, Andreassen K. Large subglacial meltwater features in the central Barents Sea // *Geology*. 2017. Vol. 45. Is. 2. P. 159-162. doi:10.1130/G38195.1

Gattaulin V., Mangerud J., Svendsen J.I. The extent of the Late Weichselian ice sheet in the southeastern Barents Sea // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 453–474. doi: 10.1016/S0921-8181(01)00135-7

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

Jakobsson M., Larry A.M. Polar Region Bathymetry: Critical knowledge for the prediction of global sea level rise // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 8: 788724. doi: 10.3389/fmars.2021.788724

Patton H., Hubbard A., Andreassen K., Auriac A., Whitehouse P.L., Stroeven A.P., Hall A.M. Deglaciation of the Eurasian ice sheet complex // *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 169. P. 148-172. doi: 10.1016/j.quascirev.2017.05.019

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. 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, P. 1-5. doi: 10.3997/2214-4609.201602144*

Terekhina Y.E., Tokarev M.Y., Pirogova A.S., Roslyakov A.G., Shalaeva N.V., Semenova A.A. Approach to 3D seismic data interpretation for drilling geohazard assessment // *Near Surface Geoscience, EAGE, 2015, P. 1-4. doi: 10.3997/2214-4609.201413747*

NEW DATA ON SIGNS OF THE MAXIMUM EXTENT OF THE LAST GLACIATION IN THE PECHORA SEA

¹Khlebnikova O.A., ²Repkina T.Y., ¹Terekhina J.E., ³Solovyeva M.A., ⁴Rybalko A.E.,
⁵Kolubakin A.A.

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³DecoGeophysics, Moscow, Russia

⁴SPbSU, St. Petersburg, Russia

⁵RN-Exploration, Moscow, Russia

The problem of the Barents Sea Ice Sheet southern boundary location is one of the controversial issues of the paleogeography of the region. The paper summarizes the published data on the distribution of erosion-accumulation geological formations characteristic of glacial and periglacial shelves on the Pechora shelf. Based on the interpretation of standard seismic exploration data 2D and 3D reconstructed a network of paleochannels that can be compared with the Pra Pechora valley. The boundaries of the distribution of perennial breeds have been clarified. The evidence is given that during the last glacial maximum the glaciation boundary was in the area of the «Kolguev line», and on the coastal shallow water there were periglacial conditions.

Keywords: *Pechora Sea, relief, Valdai glaciation, permafrost rock mass, river Pra-Pechora*