

Дистанционные признаки карстового процесса на Беломорско-Кулойском плато

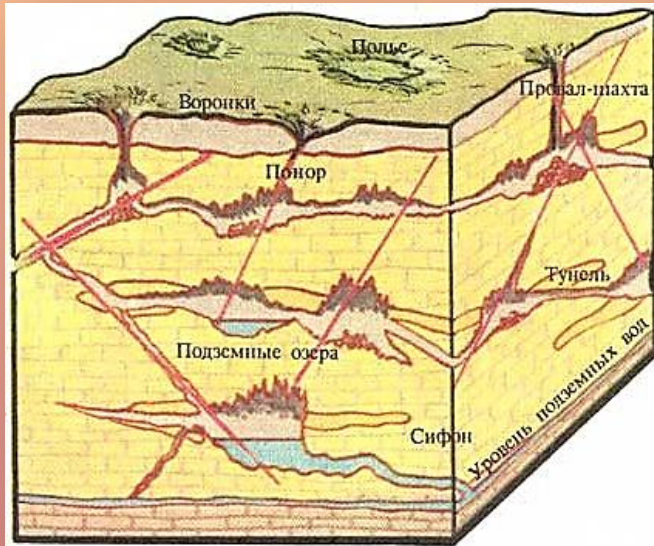
Полякова Е.В.^{1,2}, Кутинов Ю.Г.¹, Минеев А.Л.¹, Чистова З.Б.¹

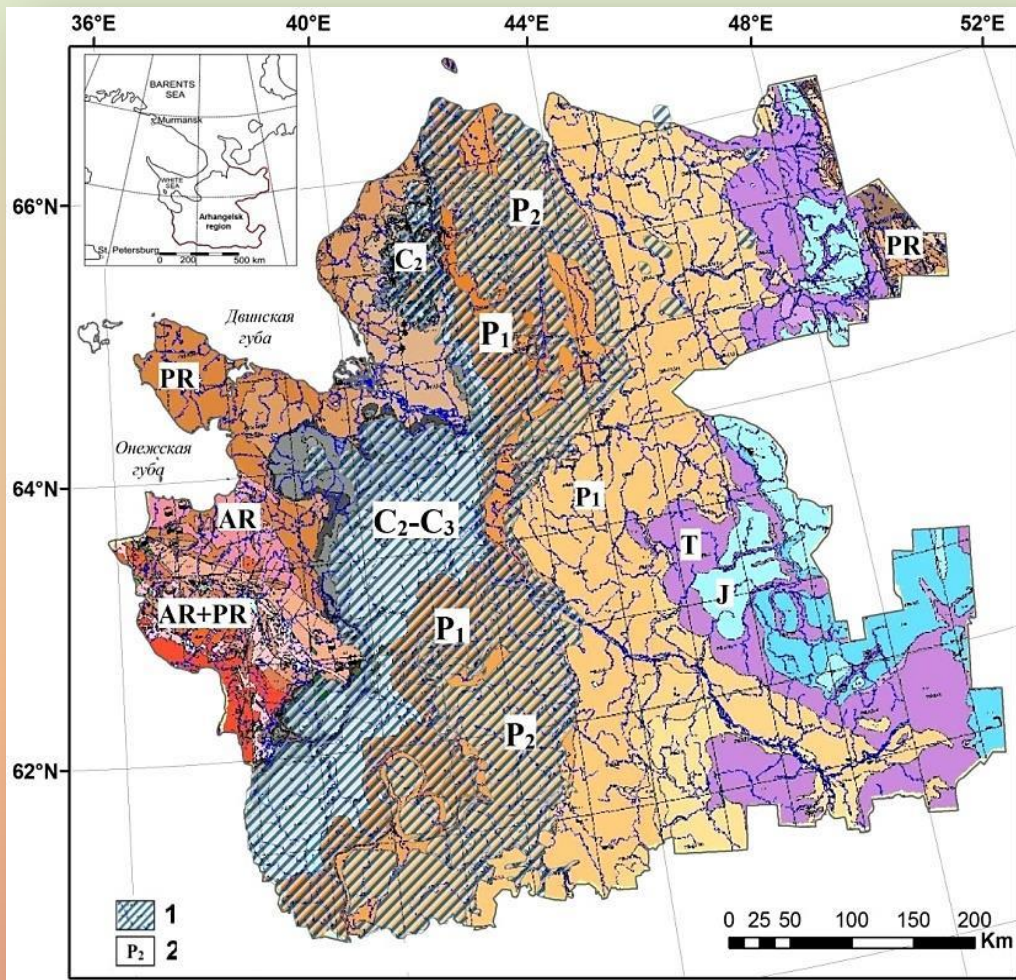
¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова УрО РАН, г. Архангельск

²Институт космических исследований РАН, г. Москва

**Двадцать вторая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
11 - 15 ноября 2024 г. в Москва**

Карст – совокупность процессов и явлений, связанных с деятельностью воды и выражающихся в растворении горных пород и образовании в них пустот, а также своеобразных форм рельефа, возникающих на местностях, сложенных сравнительно легко растворимыми в воде горными породами (гипсами, известняками, мраморами, доломитами и каменной солью).





Распространение карстующихся пород на территории Архангельской области:

1 – полоса развития карстующихся пород, 2 – геологический возраст пород: AR – архейские, AR-PR – архей-протерозойские, PR – протерозойские, C₂ – средне-каменноугольные, C₂-C₃ – средне-верхне-каменноугольные, P₁ – нижнепермские, P₂ – верхнепермские, T – триасовые, J – юрские

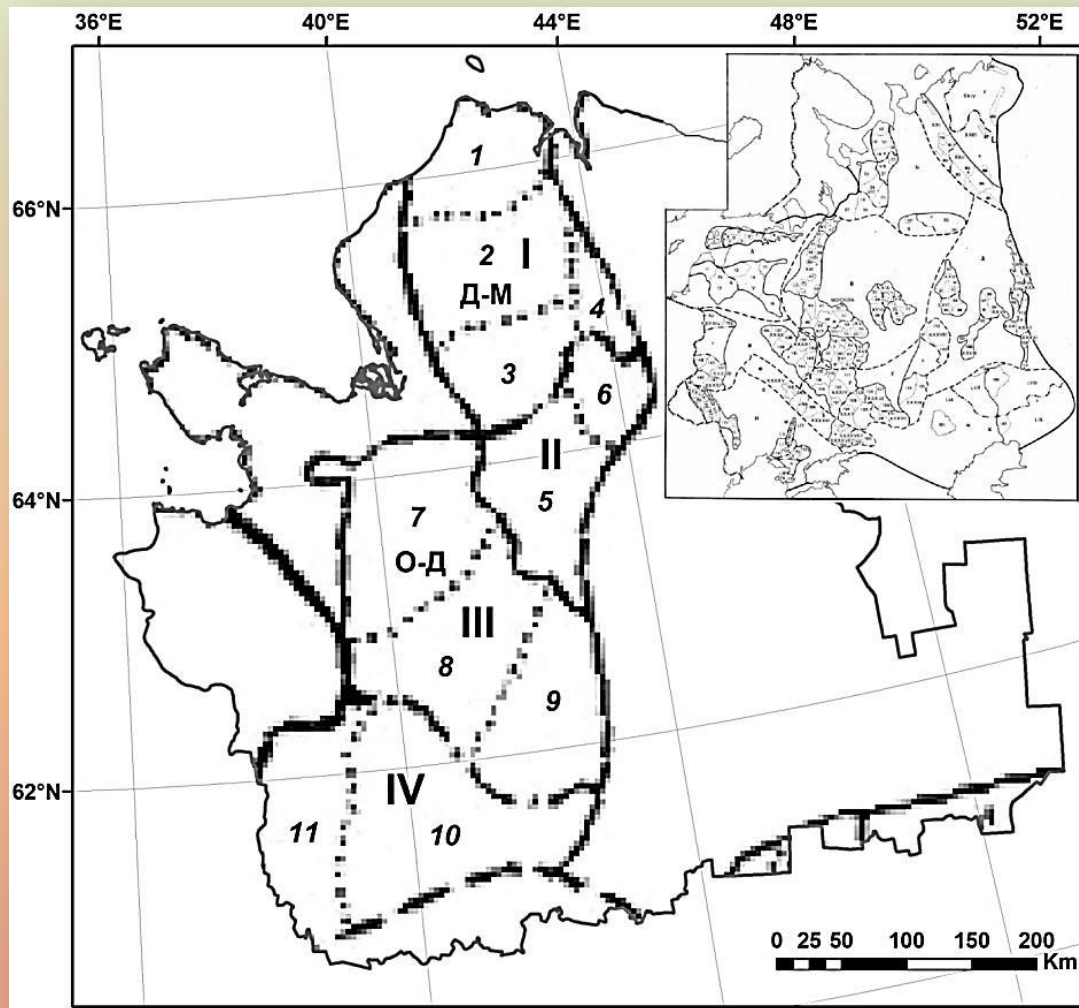
Растворимыми породами на территории области являются: известняки и доломиты каменноугольного и пермского возрастов, гипсы и ангидриты пермского возраста.

Протяженность полосы около 600 км, ширина – 100-200 км.

Суммарная площадь карстующихся пород 100,1 тыс. км², что составляет 32,4 % от материковой площади Архангельской области (Shavrina, et al., 2005).



Районирование карста Архангельской области (Чижишев, 1978)



Карстовые провинции: Д-М – Двинско-Мезенская, О-Д – Онего-Двинская; карстовые округа: I – Кулойский, II – Пинежский, III – Нижне-Двинский, IV – Верхне-Онежский; карстовые районы: 1 – Койдинский, 2 – Лакийский, 3 – Кельдинский, 4 – Олменский, 5 – Пукшенгинский, 6 – Среднепинежский, 7 – Ваймугский, 8 – Мехреньгинский, 9 – Вагинский, 10 – Няндомский, 11 – Андомский

Полоса карстующихся пород подразделяется долиной реки Северная Двина на две подзоны:

1 – Двинско-Мезенскую

с преобладающей долей открытого сульфатного и сульфатно-карбонатного карста;

2 – Онего-Двинскую

область повсеместного развития покрытого карбонатного карста.

Буровыми и геофизическими работами показано, что карстовые пустоты встречаются на глубине до 100 м от поверхности массивов (Малков и др., 2001).

Различие между этими подзонами показано на примере схемы открытого и погребенного карста, где отчетливо видно, что зоны открытого карста характеризуются свободным, а покрытого – замедленным водообменом и, как следствие, преобладанием закисных вод, слабо развитыми процессами выщелачивания материнских пород и преобладанием застойных вод.

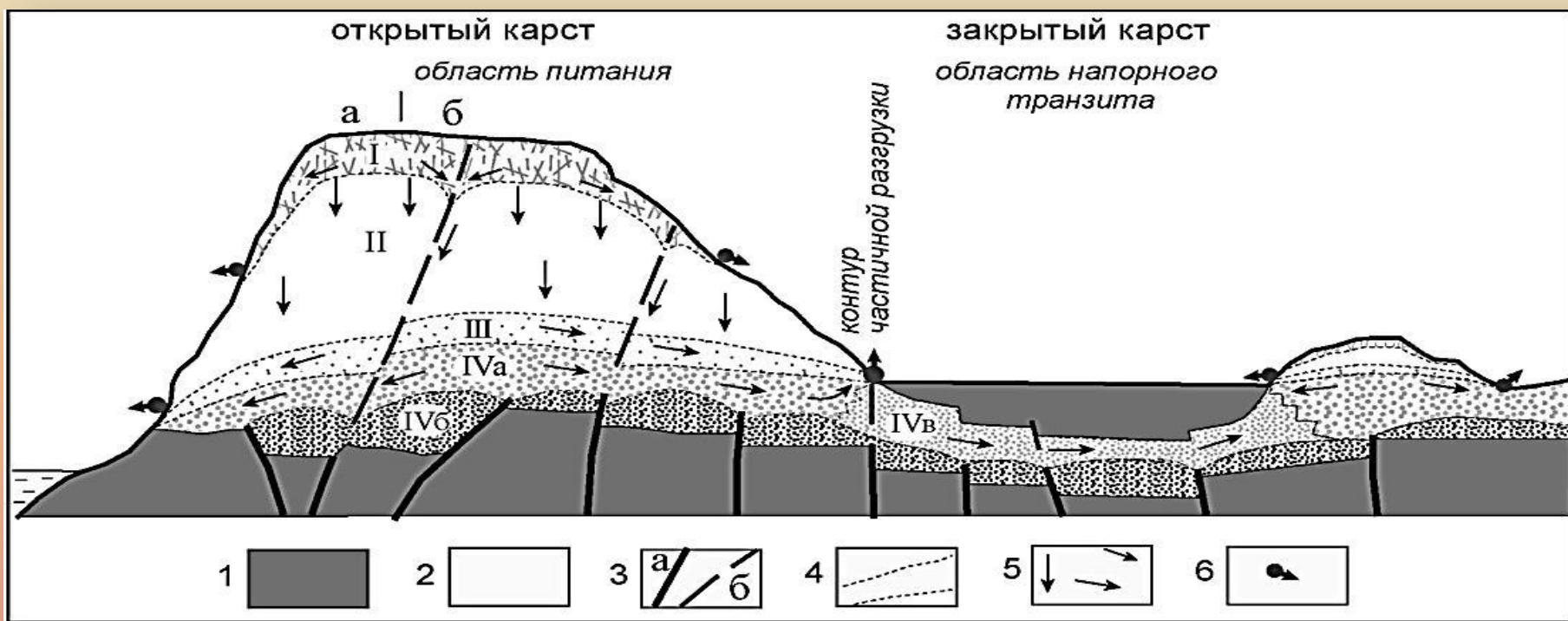


Схема гидродинамической зональности карстовых вод , (Климчук, 2009)

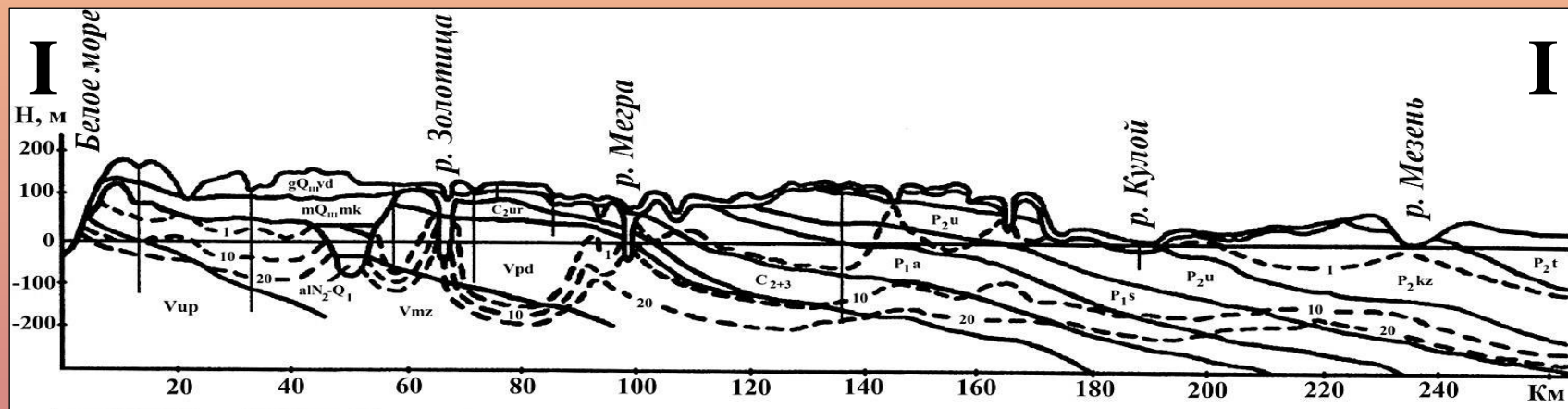
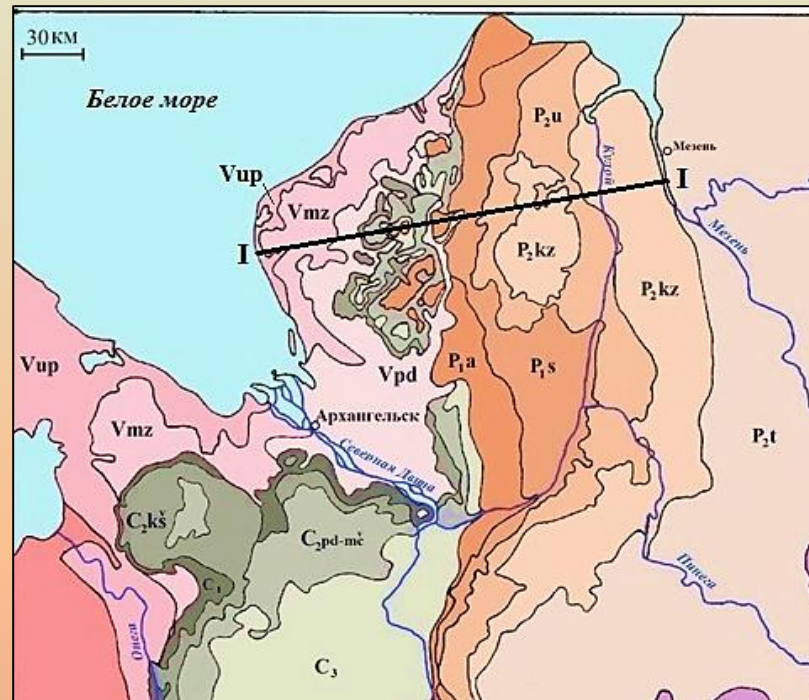
Гидродинамические зоны: I – эпикарстовая (преимущественно рассеянное питание; безнапорные воды, образующие подвешенный горизонт); II – аэрации (вадозная – преимущественно нисходящее свободное движение вод по трещинам и каналам); III – сезонных колебаний уровня (перемежающиеся условия зон II и IVa); IV – зона полного насыщения; подзоны: IVa – преимущественно безнапорных вод открытого карста с интенсивным водообменом, с локальным напором в каналах; IVб – напорных вод с интенсивным водообменом; IVв – напорных вод (артезианского напора) закрытого карста с замедленным водообменом.

1 – слабопроницаемые породы, 2 – карстующиеся породы, 3 – тектонические нарушения: 3а – в цоколе, 3б – в карстующихся породах, 4 – границы гидродинамических зон, 5 – направления движения подземных вод, 6 – карстовые источники

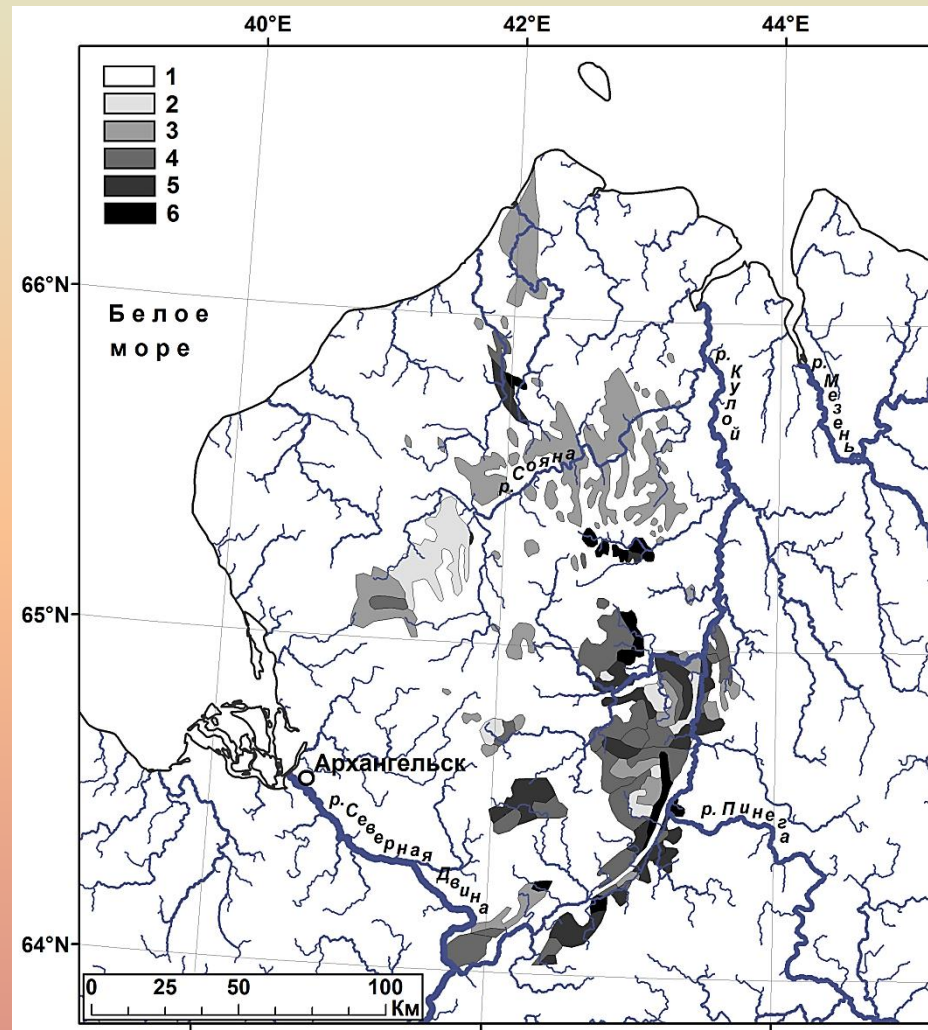
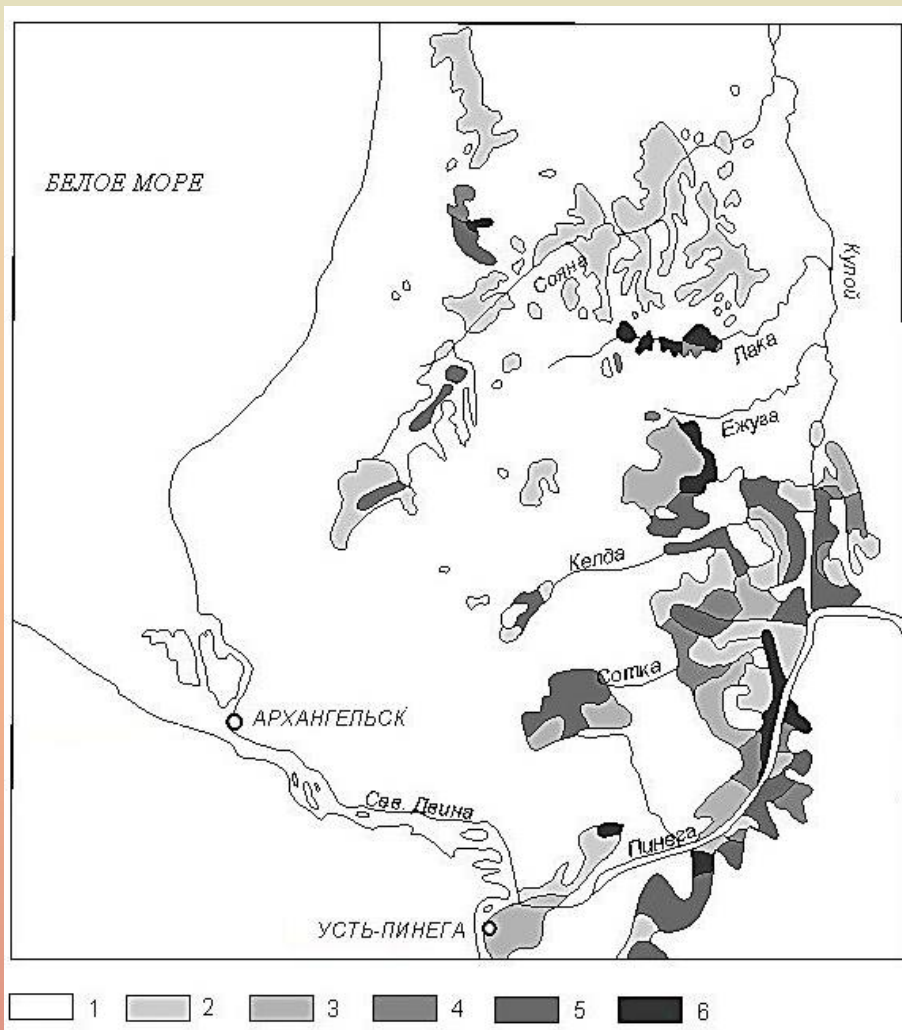
Двинско-Мезенская карстовая провинция занимает междуречье нижнего течения рек Северной Двины и Мезени.

Территория сложена известняками, доломитами, гипсами, ангидритами, мергелями, аргиллитами, алевролитами и песчаниками каменноугольного и пермского возраста. Верхнепалеозойские породы характеризуются слабым падением на восток-северо-восток. В том же направлении отмечается смена древних отложений (средний карбон) более молодыми (верхняя пермь). Сверху они почти повсеместно перекрыты песчано-глинистыми четвертичными осадками, преимущественно ледникового происхождения.

Рельеф – плоскоравнинный. Большую часть провинции занимает Беломорско-Кулойское плато, которое на юге и востоке переходит в низменную пологохолмистую равнину.

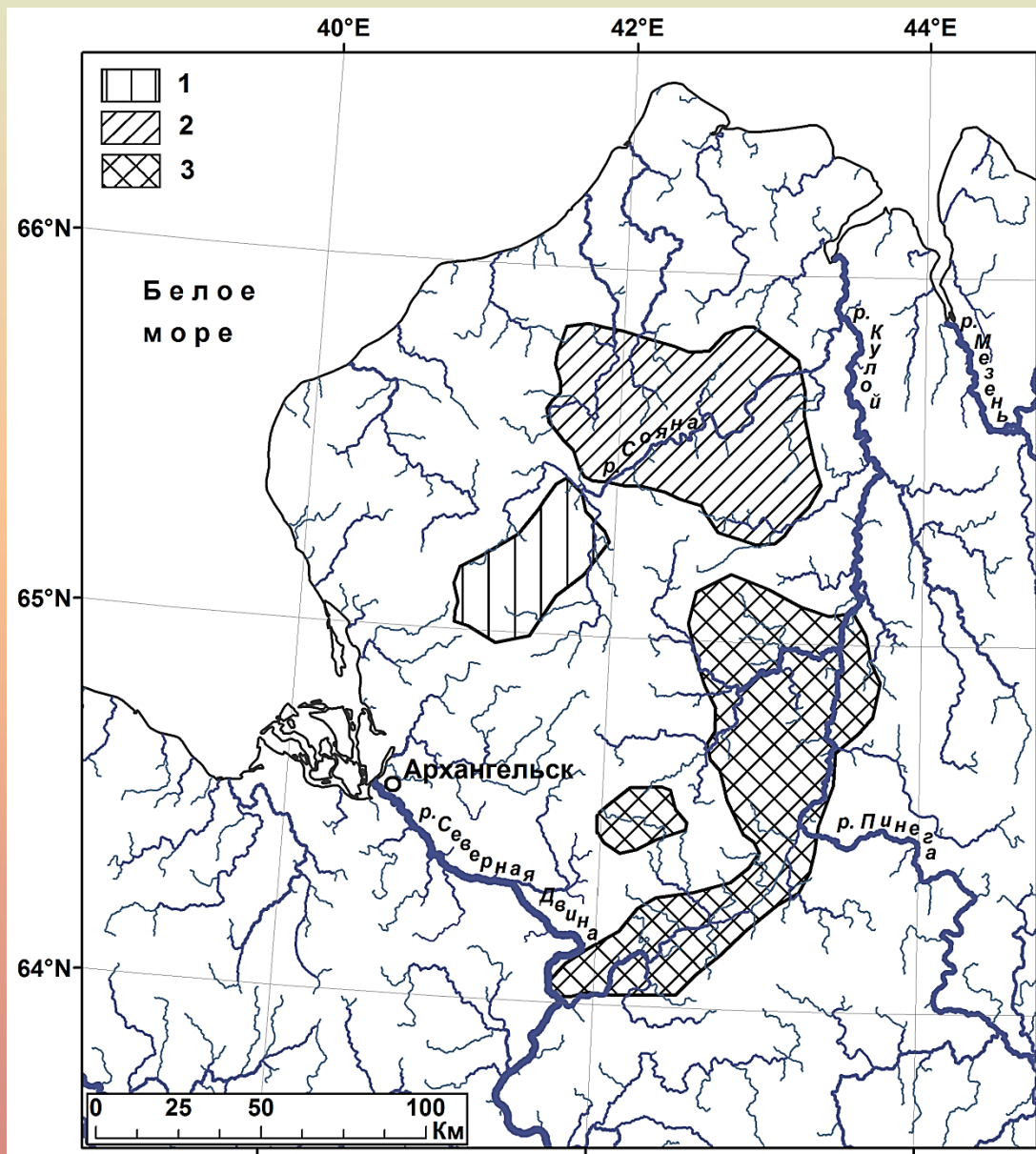


Картограмма уровня современной закарстованности территории Беломорско-Кулойского плато, по (Торсуев, 1985)

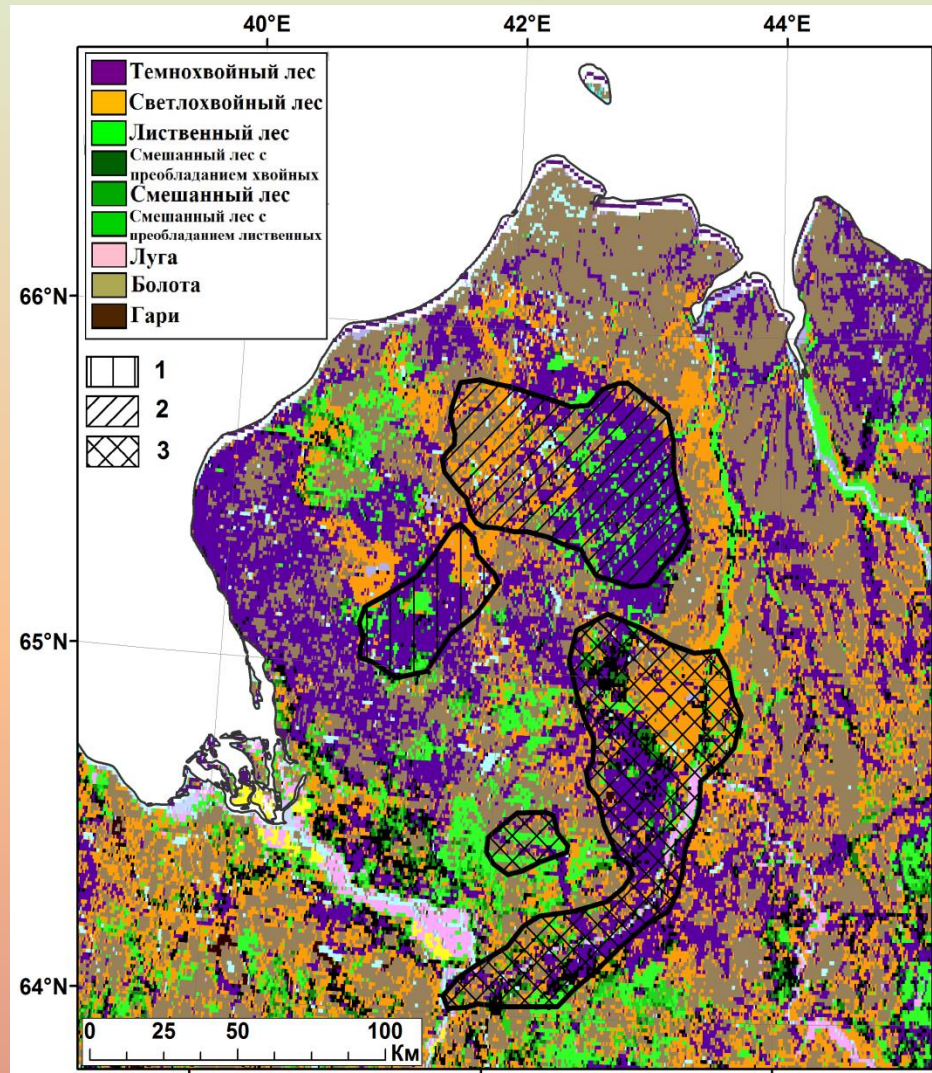


1 – не выражена; 2 – слабая; 3 – средняя; 4 – значительная; 5 – высокая; 6 – предельная

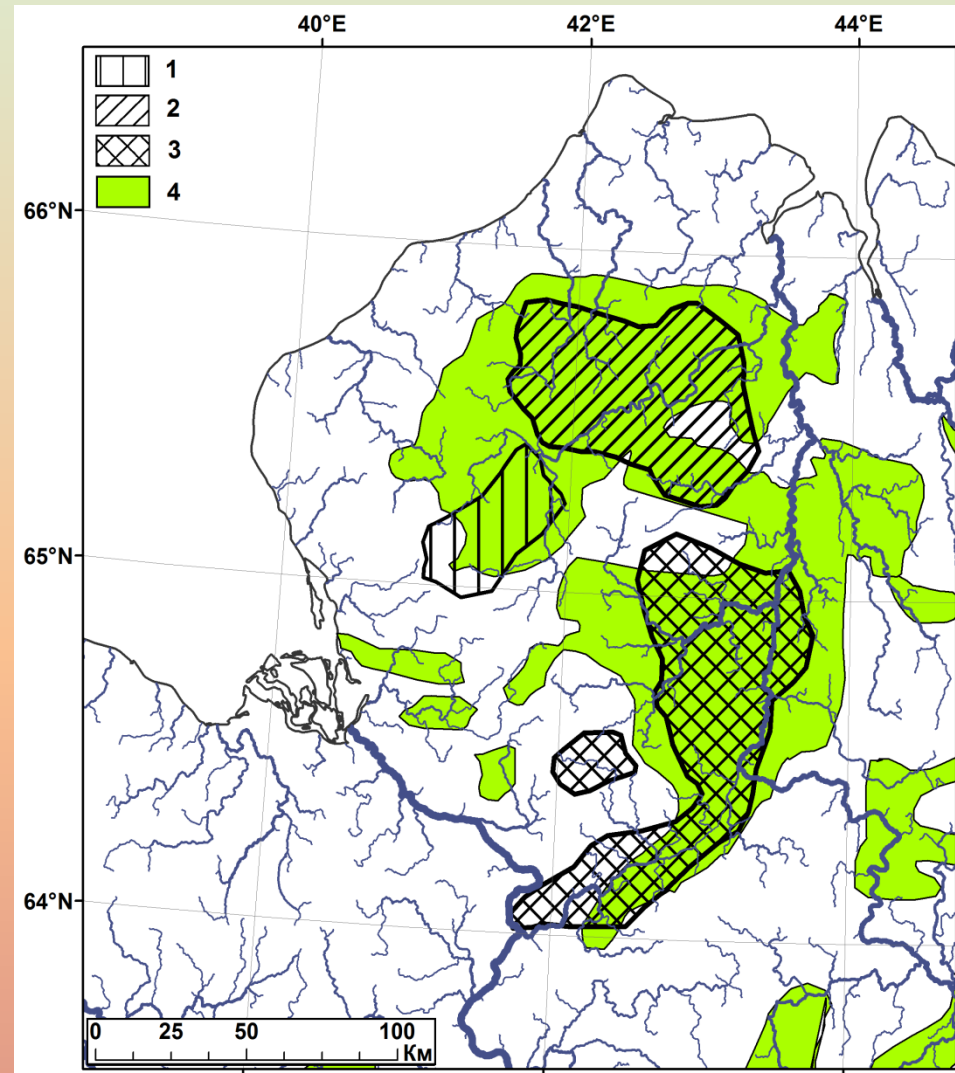
Закарстованность Беломорско-Кулойского плато



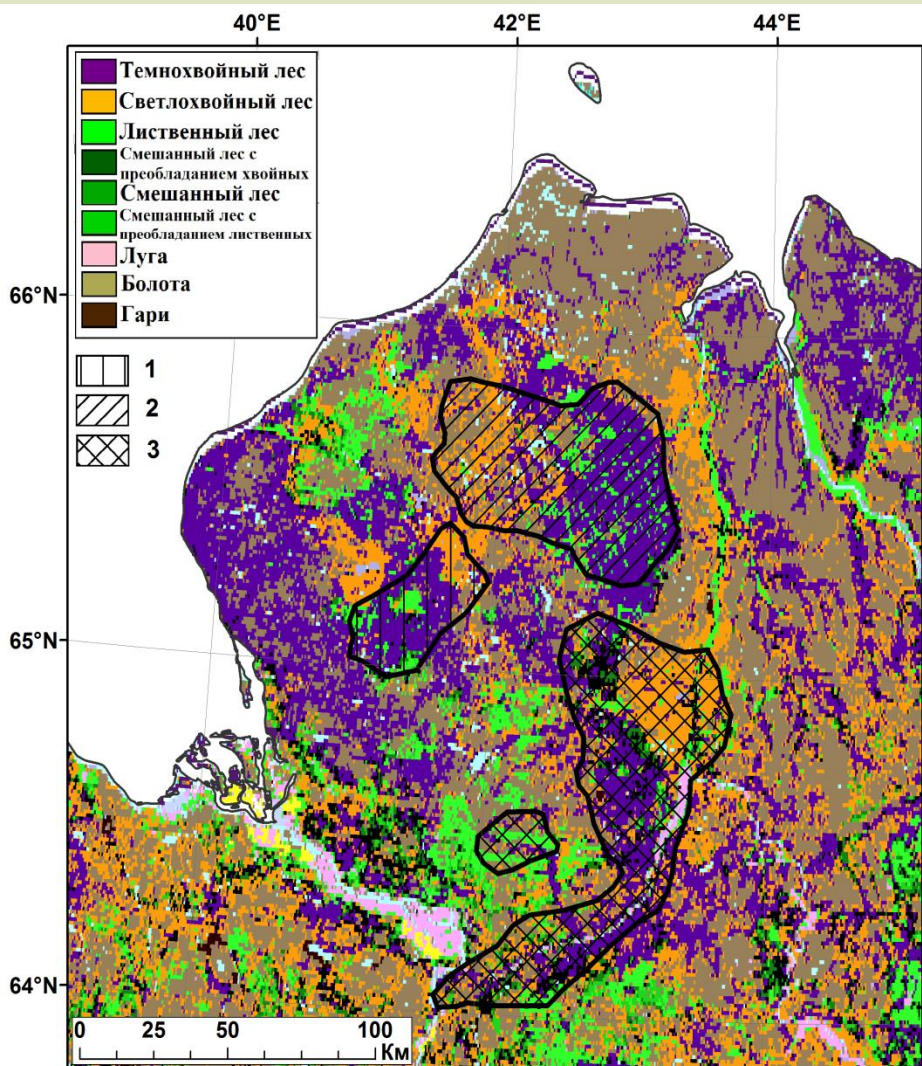
- 1 – незначительная
- 2 – средняя
- 3 – высокая



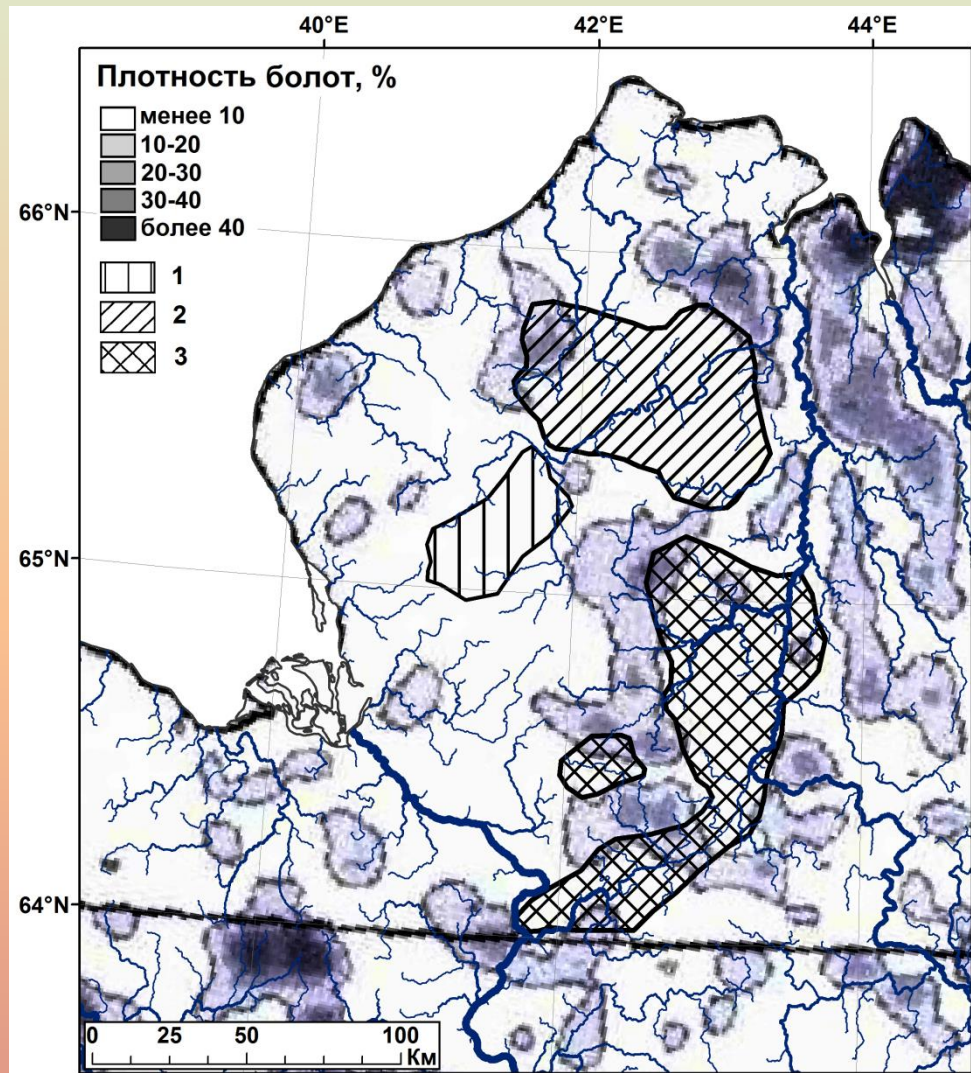
Породный состав лесов
 (с сайта Vega-Science, ИКИ РАН
<http://sci-vega.ru/>)



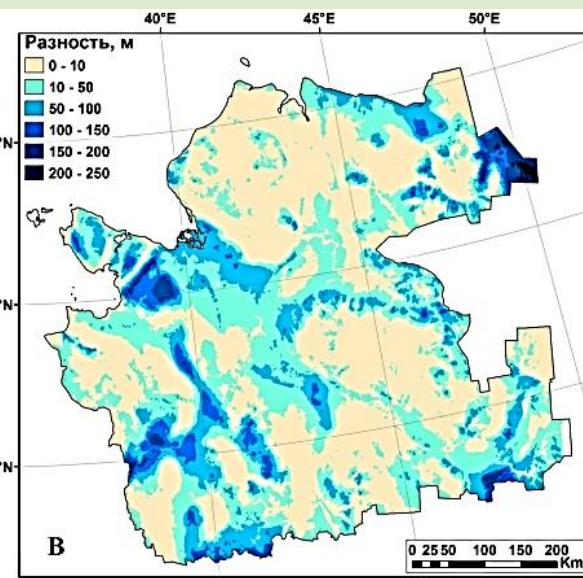
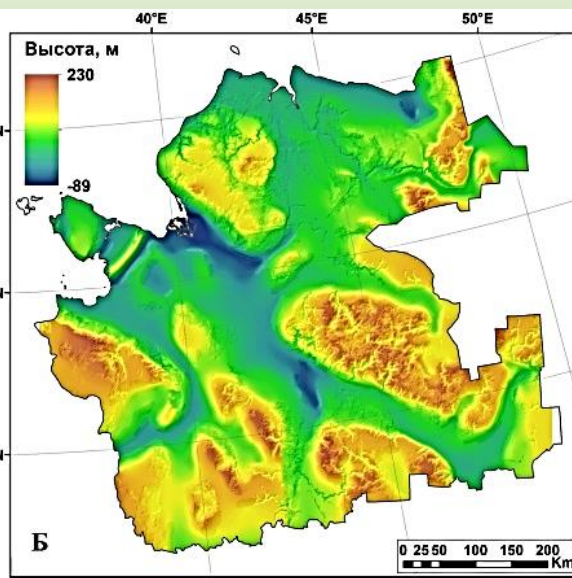
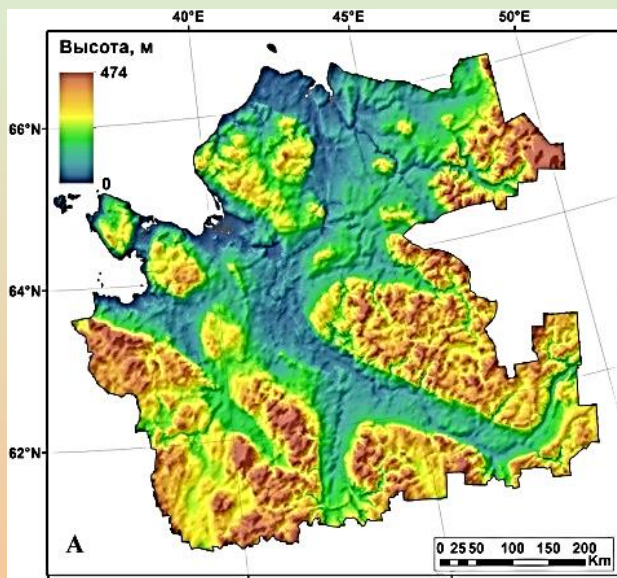
Распространение лиственных лесов,
 по (Neverov et al., 2017)



Породный состав лесов
 (с сайта Vega-Science, ИКИ РАН
<http://sci-vega.ru/>)



Карта плотности болот,
 по (Губайдуллин, 2002)



Цифровые модели рельефа поверхности (А), коренных пород (Б) и карта разности между ними (В)

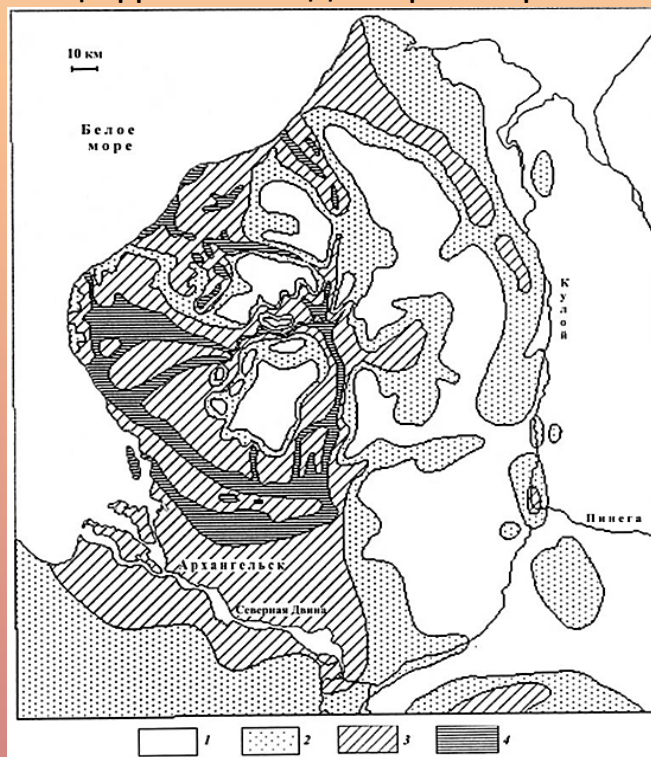
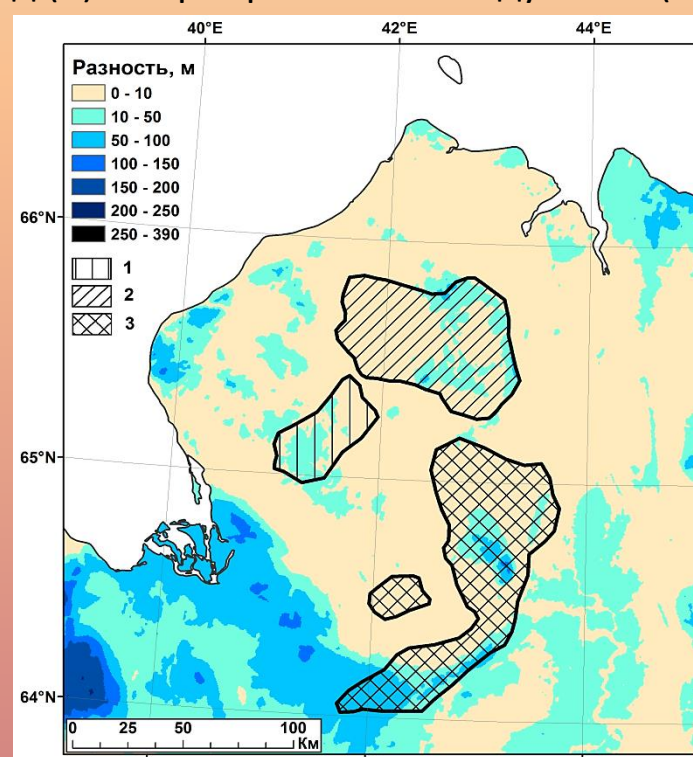
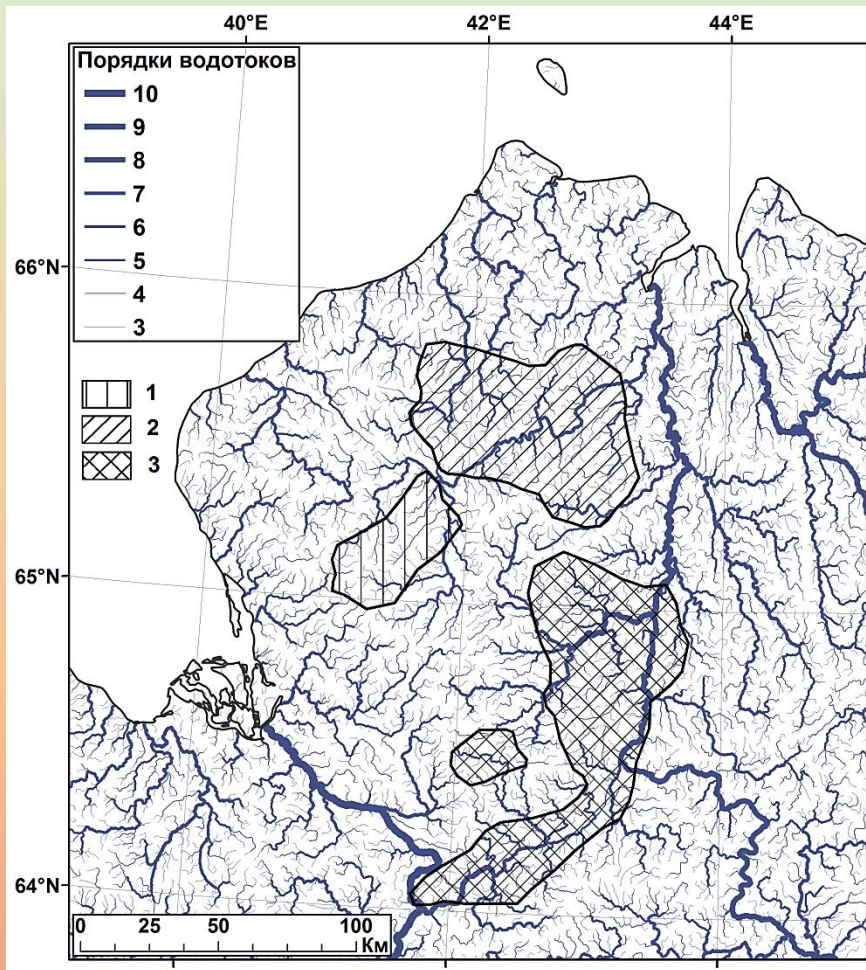
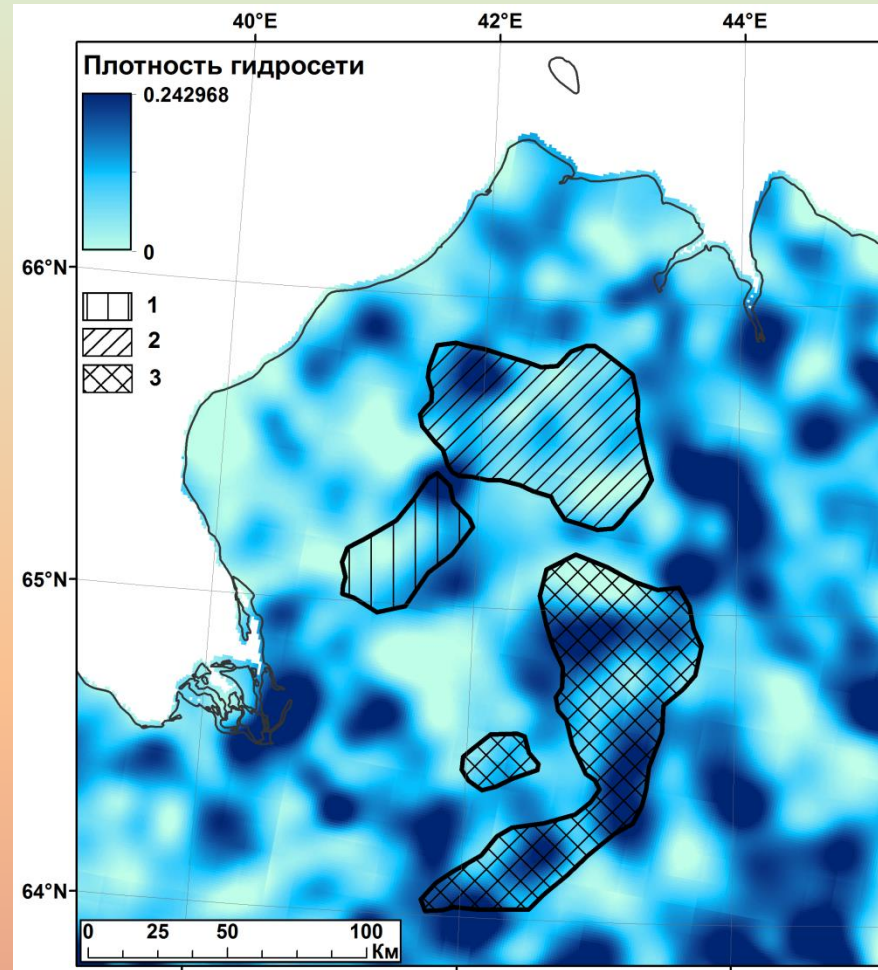


Схема мощностей четвертичных отложений Юго-Восточного Беломорья, по (Малов, 2003):
 1 – до 10,
 2 – 10-20,
 3 – 20-100,
 4 – >100





Порядок водотоков по методу Стралера (Strahler, 1957)



Плотность гидросети, рассчитанная в окне 1 км

Водотоки могут быть постоянными и временными (пересыхающими).

На равнинных территориях и в условиях умеренного климата постоянный водоток обычно имеют речные долины, начиная с 3 и 4 порядков. Долинам 1 и 2 порядков соответствуют овраги, промоины и временные (сезонные) ручьи.

Характер р. Сотка в Пинежском заповеднике

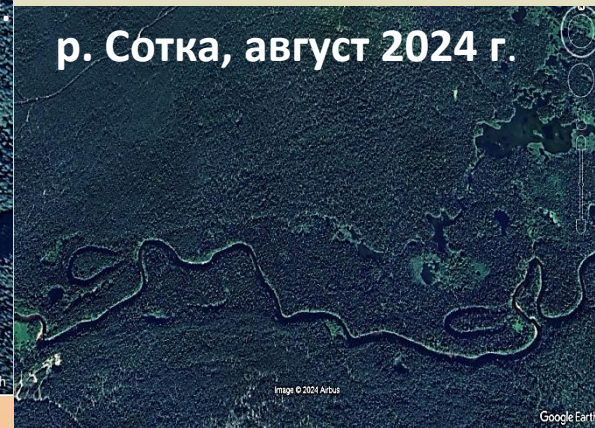
р. Сотка, август 2013 г.



р. Сотка, август 2018 г.

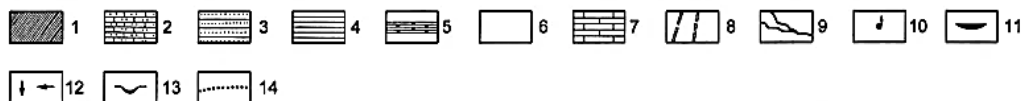
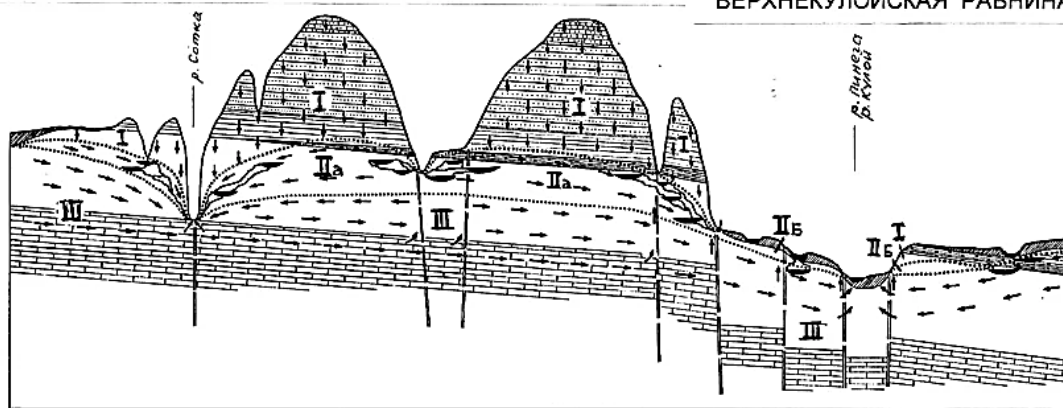


р. Сотка, август 2024 г.



БЕЛОМОРСКО-КУЛОЙСКОЕ ПЛАТО

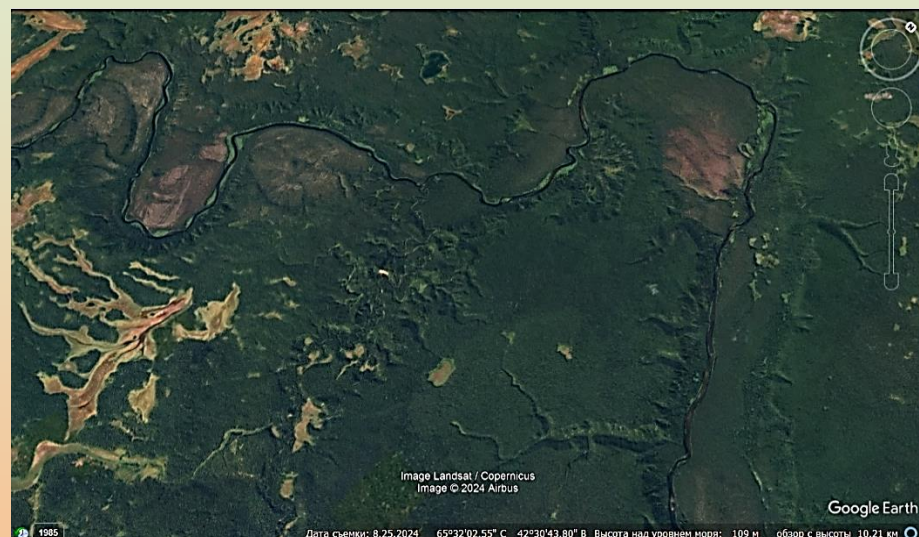
ВЕРХНЕКУЛОЙСКАЯ РАВНИНА



Гидрогеологические зоны: I – азрации, II – неполного рассредоточенного насыщения (а – изолированные разноуровневые водотоки, б – водоёмы с сезонным колебанием уровня карстовых вод), III – полного насыщения.
 1 – четвертичный покров; Некарстолиты: 2 – карбонатно-терригенная формация (P_1KZ_1); 3 – сульфатно-терригенная субформация (P_2U_1); Карстолиты: 4 – терригенно-сульфатная субформация (P_2U_1); 5 – сульфатно-карбонатная субформация (P,K); 6 – сульфатная субформация (P_1Sot); 7 – карбонатная формация ($C_{2-3} - P_1a-b$); 8 – тектонические нарушения; 9 – современные и древние карстовые водоносные системы; 10 – карстовые источники; 11 – сифонные линзы; 12 – направление движения подземных вод; 13 – карстовые озёра; 14 – границы гидродинамических зон.

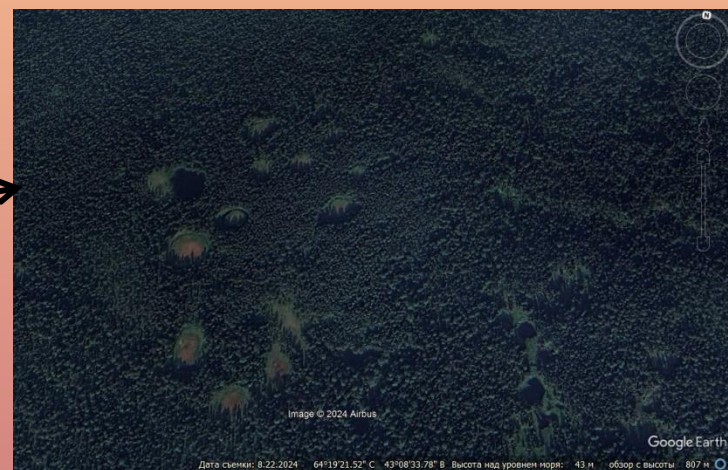
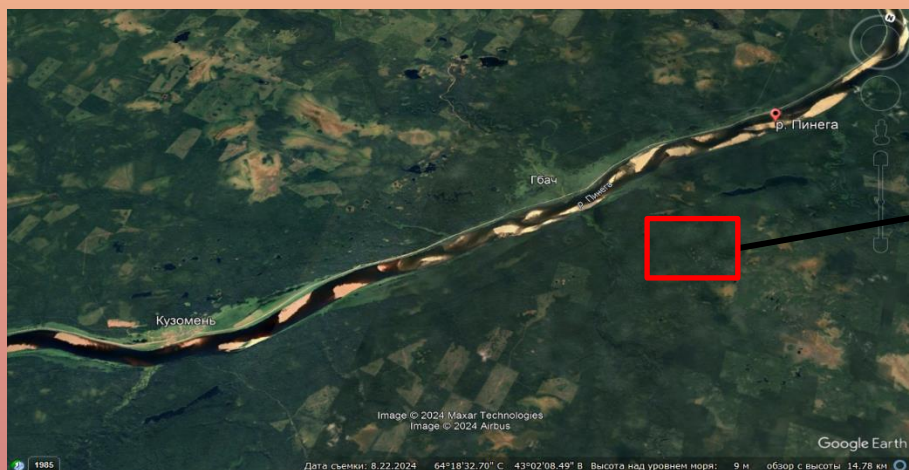
Характер гидросети в массивах с активным карстом отличается обилием резких коленообразных перегибов и спрямленными участками в продольном профиле, что вызвано трещиноватостью горных пород. Реки формируют V-образные врезанные долины, имеют скальные борты. Кроме того, часто отмечается наличие «слепых» и «полуслепых» долин и суходолов.

Характер р. Сояна в Соянском заказнике

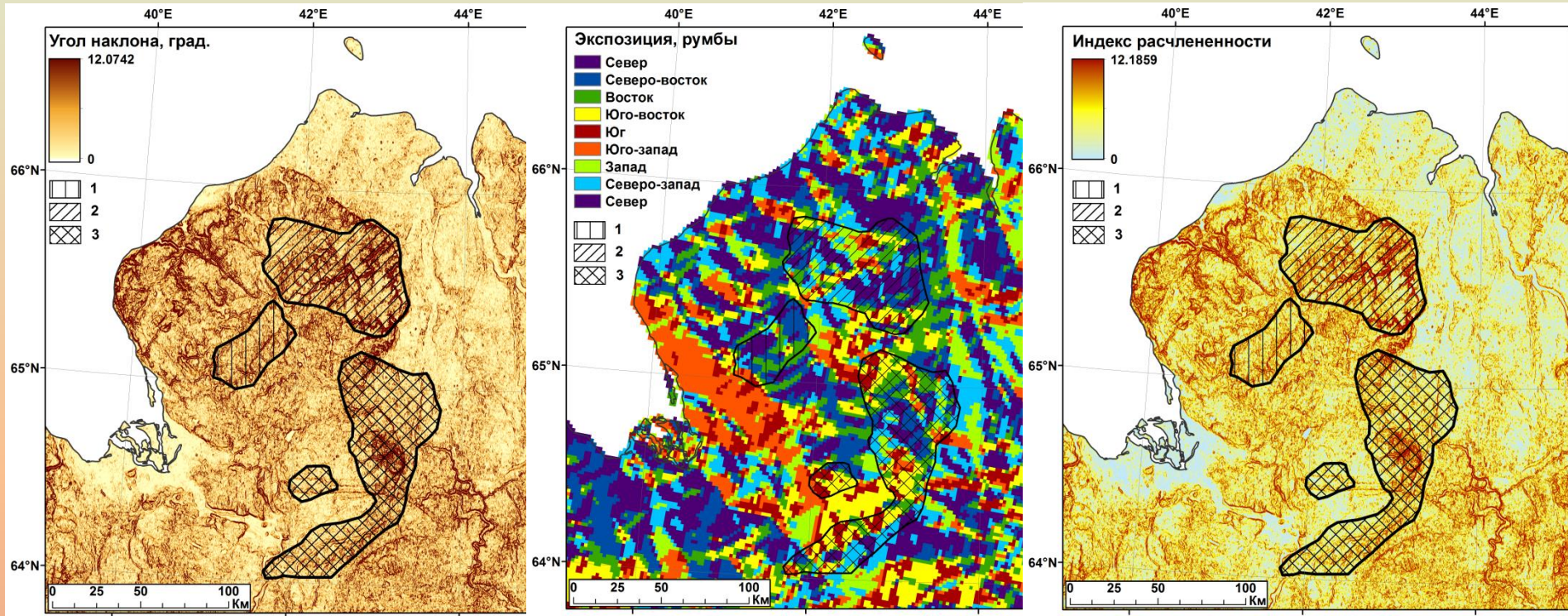


В областях распространения песчано-глинистых четвертичных пород, гидросеть имеет другой рисунок, типичный для рыхлых отложений, – перистый, дендритовидный. Густота речной сети в таких рыхлых отложениях также значительно больше. Притоки имеют сильную извилистость, а борта долин крупных рек испещрены трещинами, по направлениям совпадающими с основными тектоническими нарушениями территории.

Характер р. Пинега



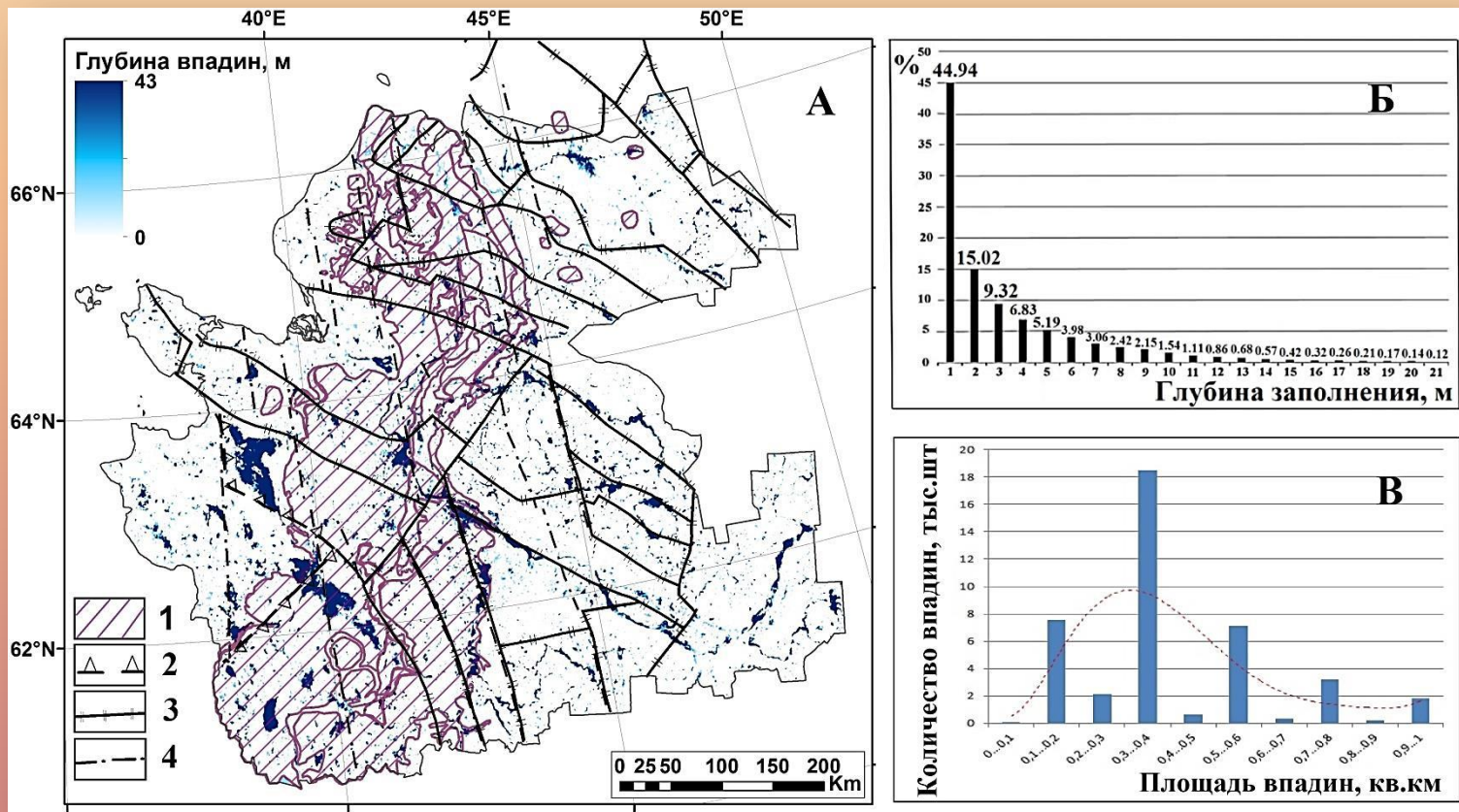
Геоморфометрические параметры



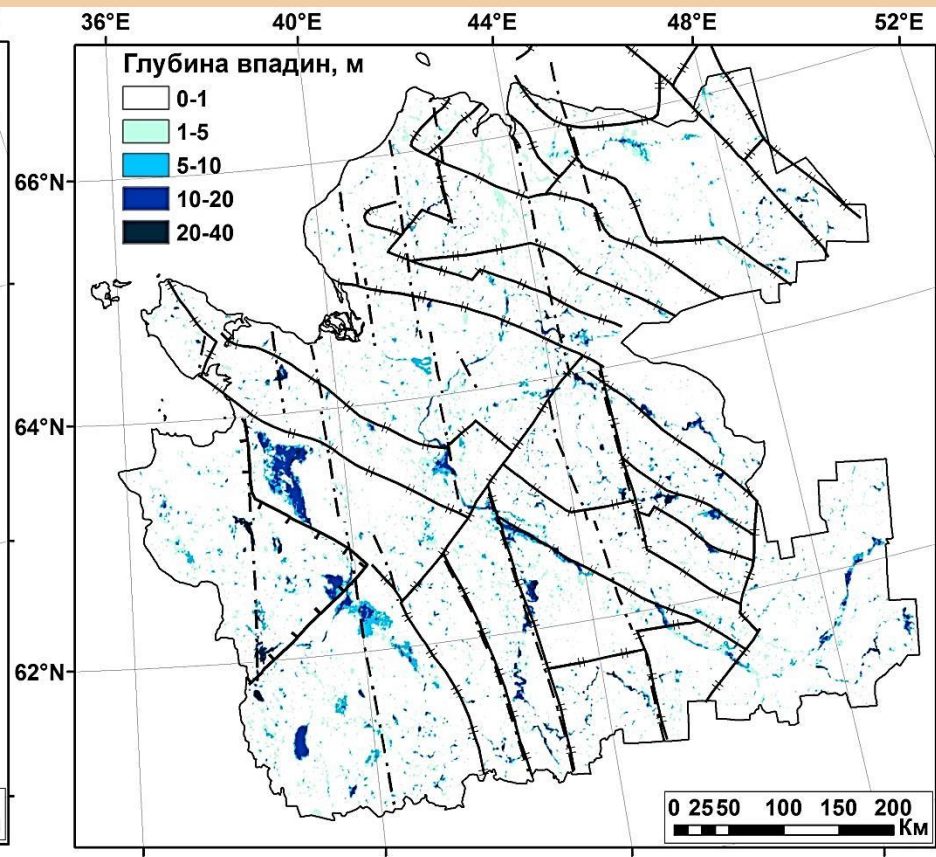
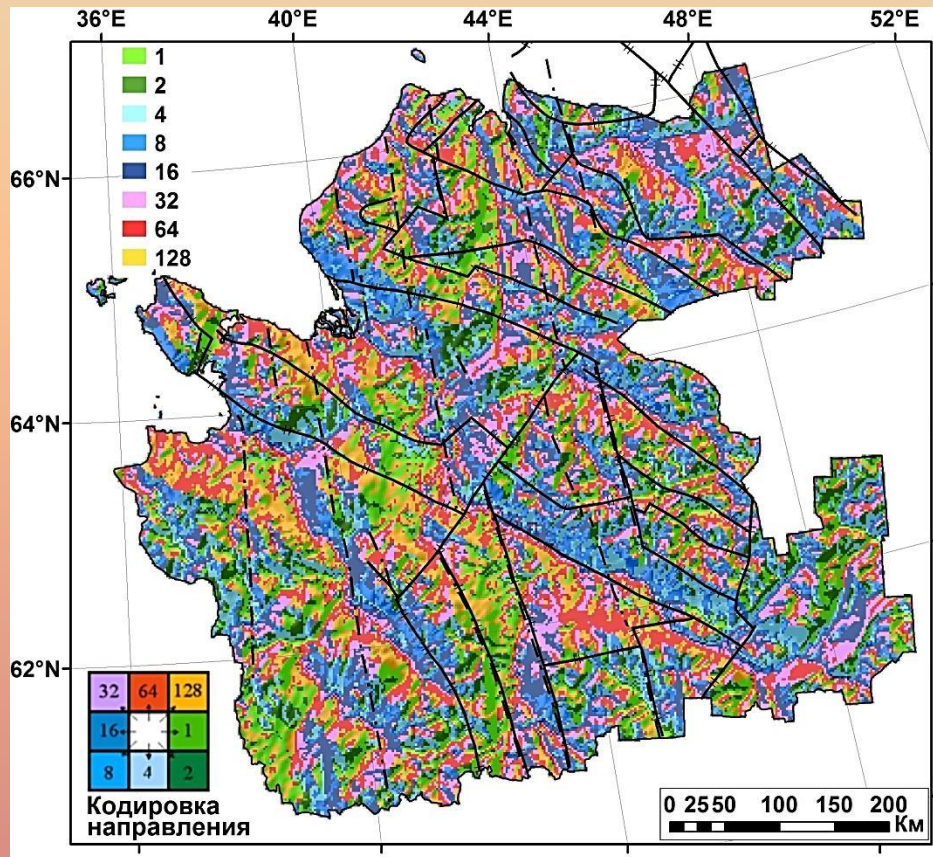
Индекс расчлененности и значения потенциальной энергии рельефа позволяют картировать плато и возвышенности, испытывающие длительное воздымание. А в комплексе с другими параметрами, такими как топографический индекс влажности и мощность перекрывающих отложений (при обязательном наличии карстующихся пород) позволяют выделять области развития открытого карста и в значительной степени дублируют друг друга.

Метод обнаружения бессточных впадин на ЦМР позволяет провести оценку предрасположенности районов к развитию карстовых процессов. Повышенная плотность бессточных впадин позволяет предположить активизацию тектонических процессов и, как следствие, повышенную дифференциацию коренных пород.

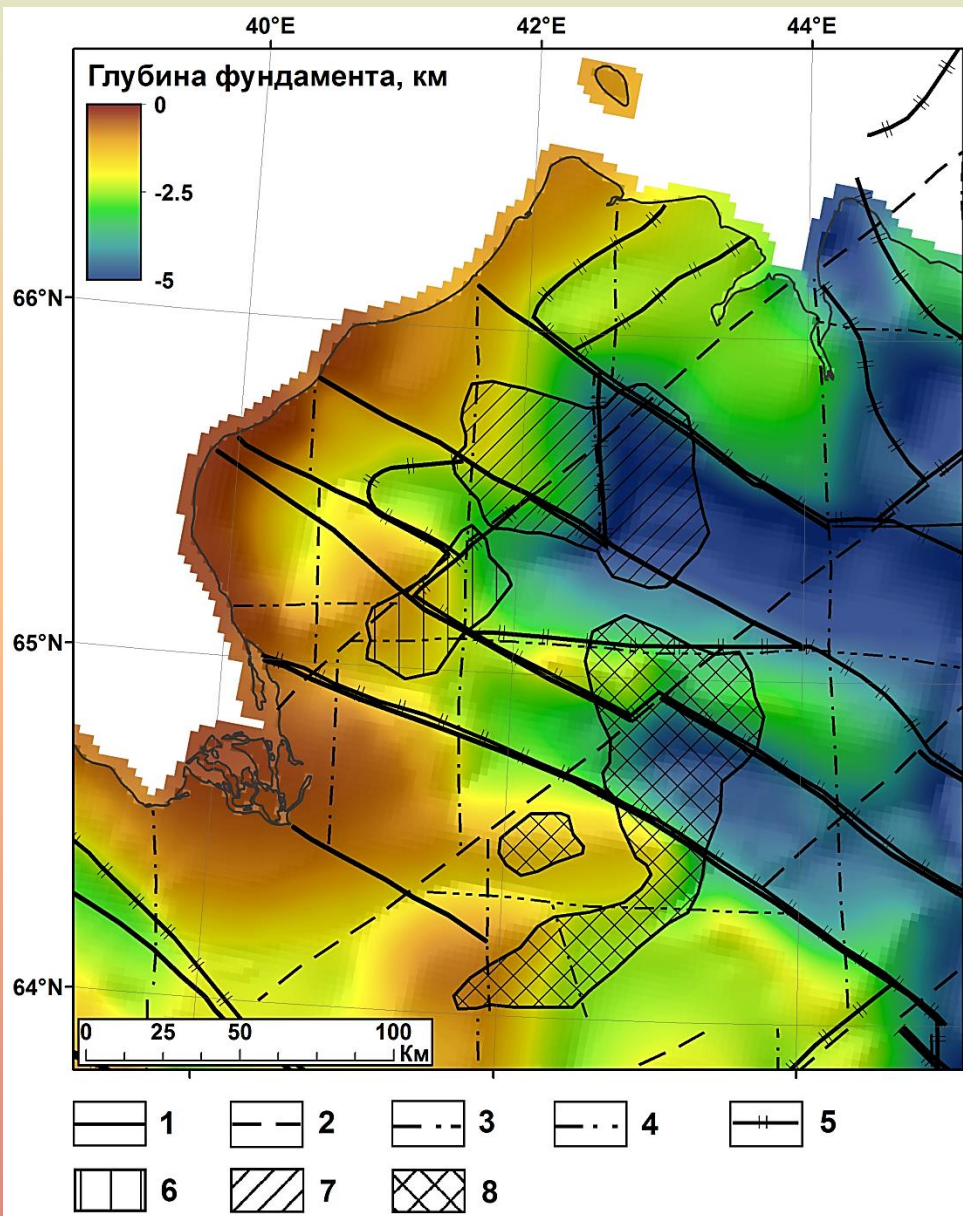
Доминирующая глубина впадин – 1 м (45 %). Впадины глубиной порядка 1-5 м составляют 81 % от всей выборки и равномерно покрывают всю территорию области. Впадины большей глубины (до 43 м) занимают относительно малые площади. Они окаймляют полосу развития карстующихся пород. Кроме того, наиболее глубокие впадины пространственно отражают простираение региональных тектонических структур.



Примененный при заполнении впадин метод (Wang, Liu, 2006) способен также определять такой параметр как направление потоков. В основе расчета лежит алгоритм поиска направления потоков с наименьшими затратами. Для территории Архангельской области преобладающим является северное и северо-восточное направление потоков, что совпадает с простиранием бессточных впадин и соответствует тектоническим структурам.



Цифровая модель поверхности фундамента



При анализе цифровой модели поверхности фундамента отмечается, что по тектоническим крутопадающим зонам и разломам формируются провальные и обвальные карстовые формы. Тектонически пологим зонам соответствуют карстовые лога и долины на поверхности. Воздымающийся характер тектонических движений способствует усилению развития карстового процесса.

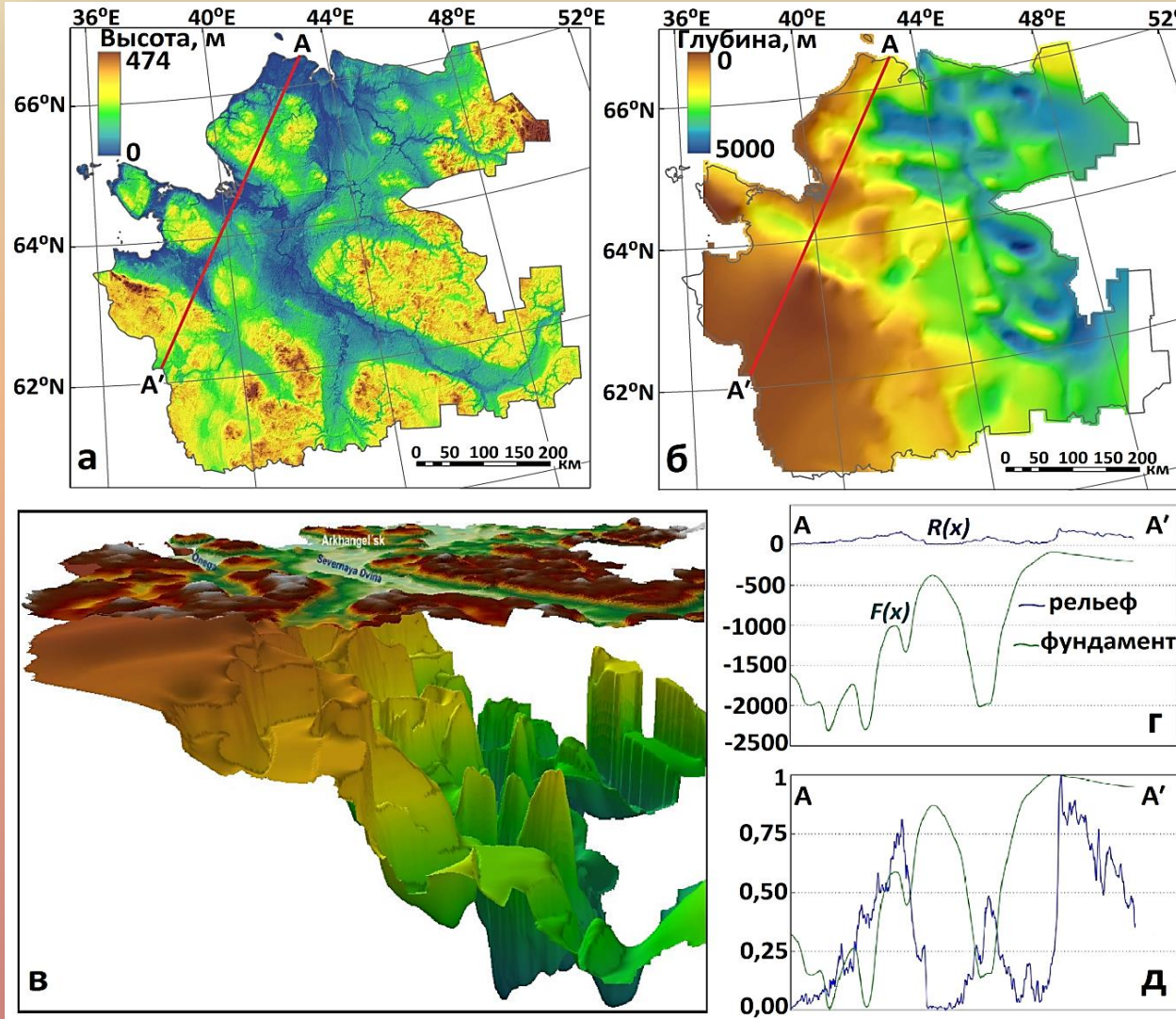
1-4 – основные тектонические нарушения мантийного происхождения;

5 – границы структур фундамента Русской плиты;

6-8 – закарстованность:

6 – незначительная, 7 – средняя, 8 – высокая

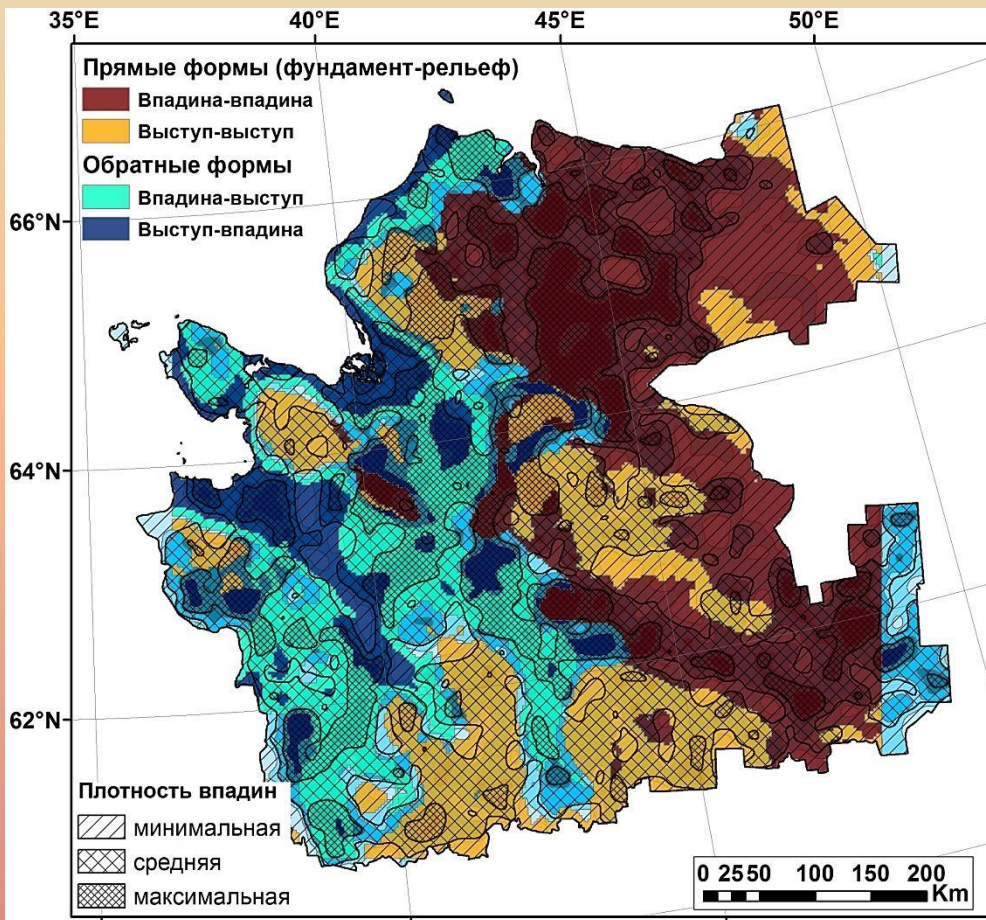
Интересные результаты были получены при анализе отражения структур фундамента в современном рельефе, рассчитанными по авторской методике. Структуры наследования были разделены на следующие формы (фундамент-рельеф): прямые – выступ-выступ, впадина-впадина; и обратные (или реверсивные) – выступ-впадина, впадина-выступ.

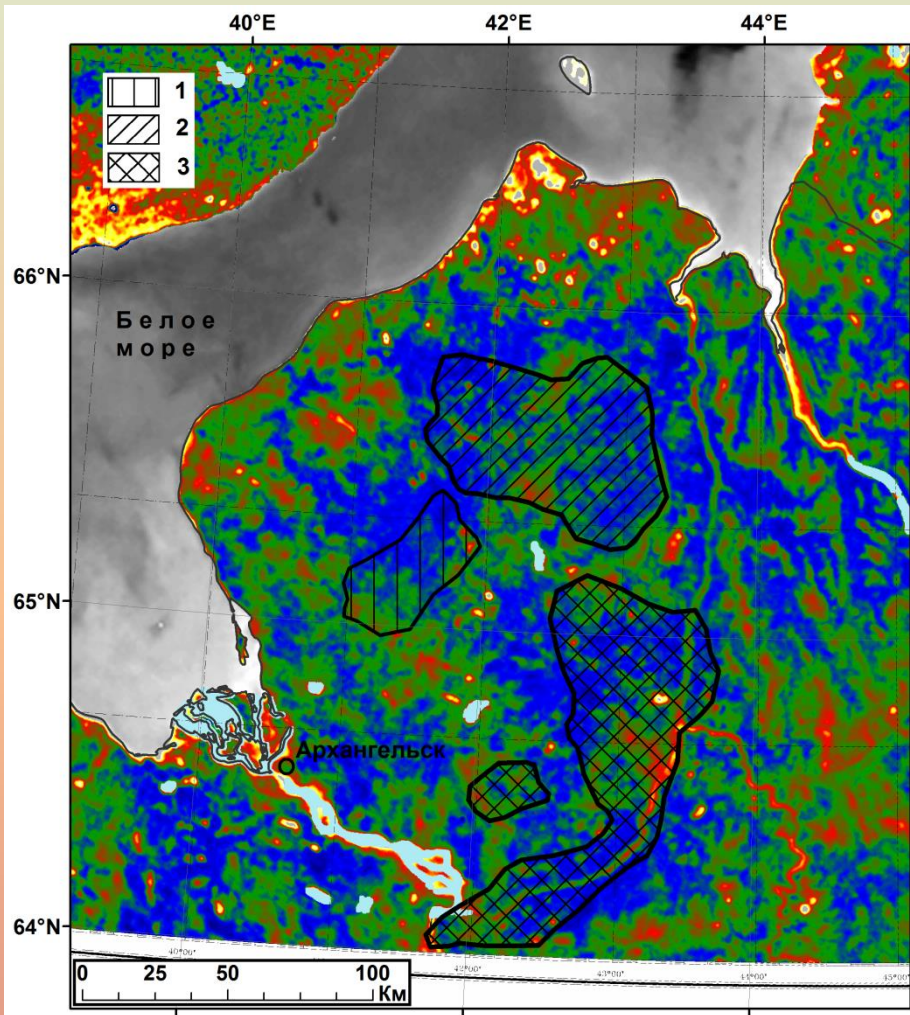


а – цифровая модель рельефа на территорию Архангельской области;
б – цифровая модель рельефа поверхности фундамента;
в – сопоставление моделей в 3D;
г – график значений по профилю А-А';
д – график нормированных значений по профилю А-А'

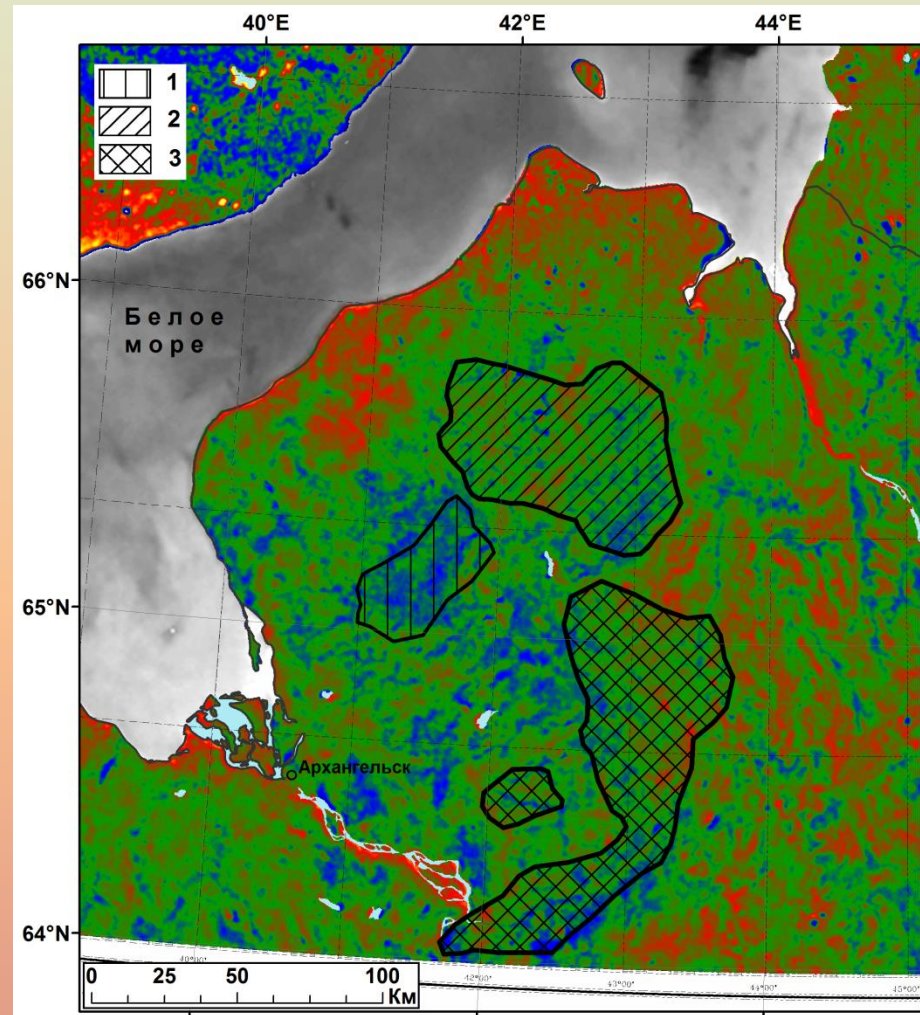
Сопоставление этих данных с плотностью бессточных впадин показало, что подзона открытого карста пространственно совпадает с прямыми формами проявления фундамента в рельефе; а покрытого карста – с обратными.

Это позволяет говорить о сквозном характере проявления тектонических структур от фундамента через осадочный чехол до современного рельефа.





Карта конвективного теплового потока по данным спутника NOAA (Горный В.И.)



Карта некоррелированного конвективного теплового потока (Горный В.И.)

Выводы.

Широкое распространение трещиноватых сульфатных и карбонатных пород, значительная расчлененность территории, небольшая мощность четвертичных отложений и сильное переувлажнение поверхности, вызванное слабым испарением, обусловили интенсивное развитие в Двинско-Мезенской провинции поверхностного и глубинного карста. Наиболее энергично карстовые процессы развиваются в местах эрозионных врезов, где рыхлый материал почти полностью денудирован и карстующиеся породы выведены на дневную поверхность.

Выделение закарстованных лесопокрытых территорий возможно по совокупности косвенных дистанционных данных, основанных на дешифрировании растительного покрова, а также геоморфометрическом анализе различных цифровых поверхностей.

A photograph of a forest with many young pine trees. In the foreground, there is a large, fallen tree trunk. The text "Спасибо за внимание!" is overlaid in red, 3D-style font across the top of the image.

Спасибо за внимание!

Контакты:

Полякова Елена Викторовна, д.г.-м.н.

lenro26@yandex.ru