

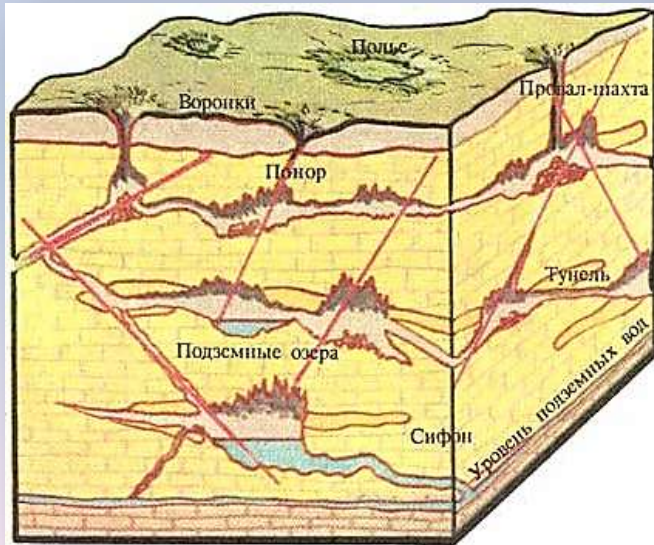
# Исследование карста Архангельской области на основе цифровой модели рельефа

**Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б.**

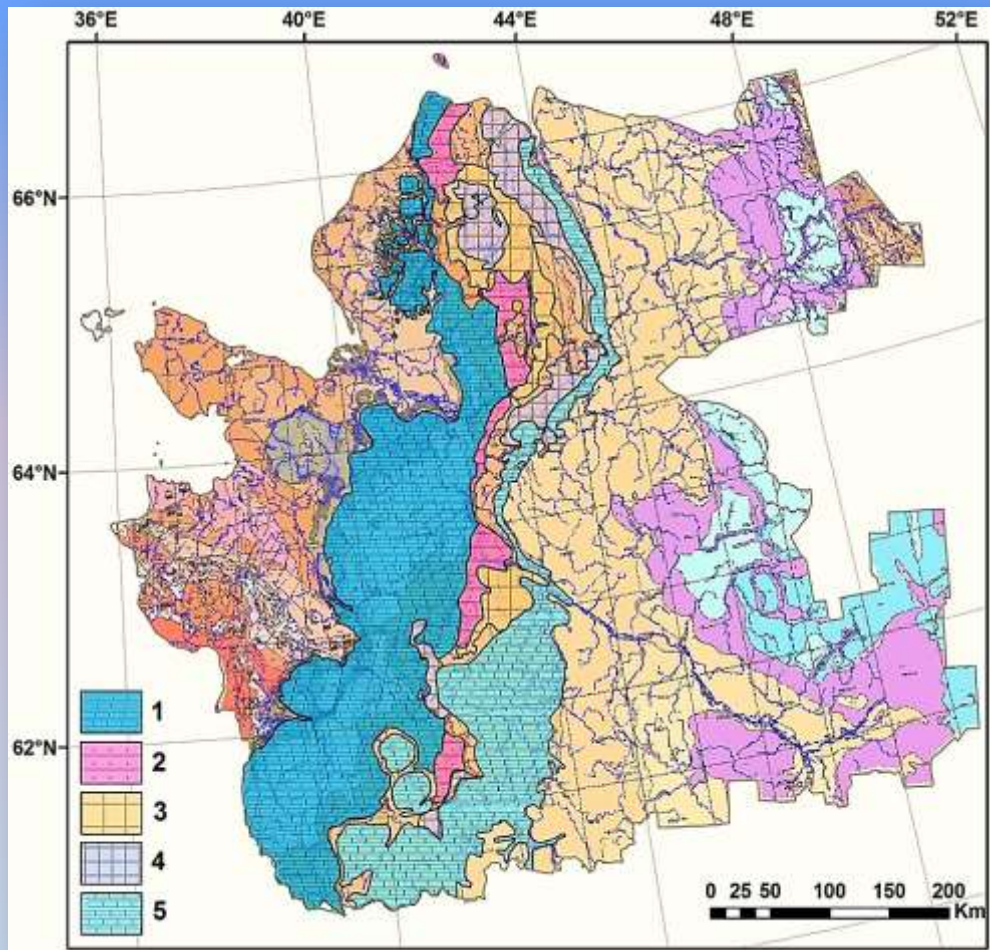
**Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
им. Н.П. Лаврова РАН, г. Архангельск**

***Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2018 г.***

**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:**

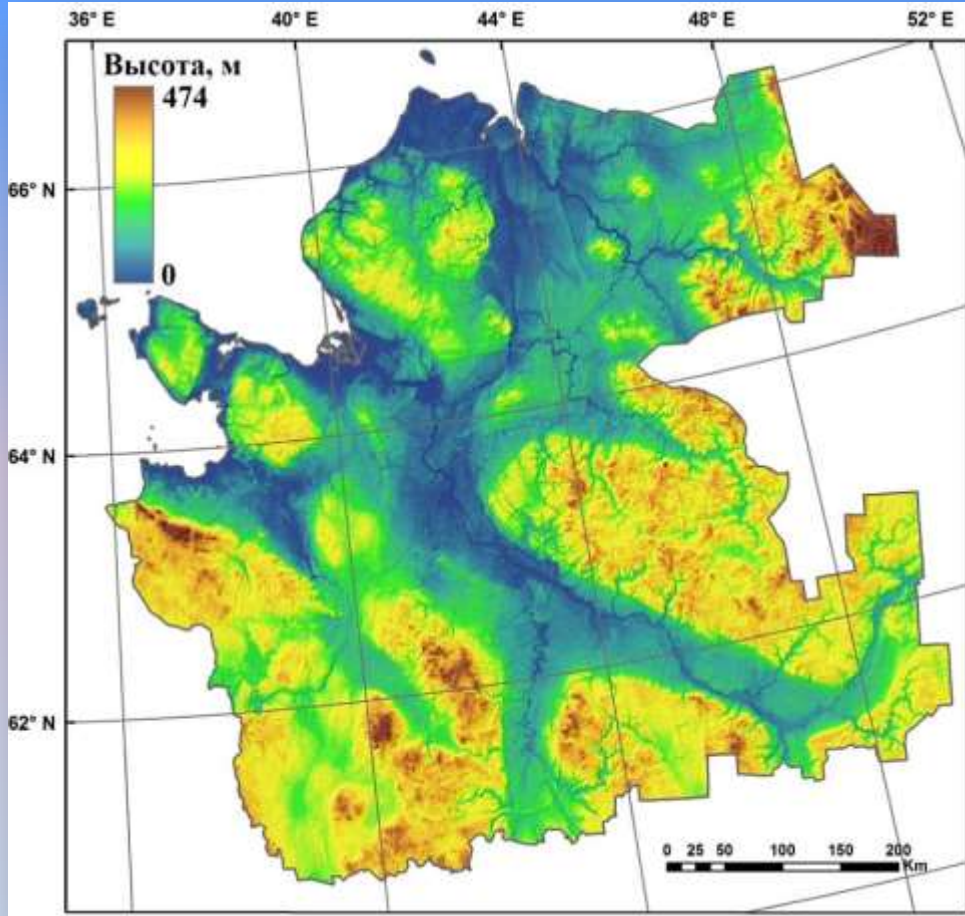
1 – карбонатные породы среднего и верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми; 2 – сульфатно-карбонатные породы сакмарского яруса нижней перми; 3 – терригенно-сульфатные породы уфимского яруса верхней перми; 4 – карбонатно-терригенные породы нижнеказанского яруса верхней перми; 5 – карбонатные породы верхнеказанского яруса верхней перми

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

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

Суммарная площадь карстующихся пород 100,1 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет 32,4 % от материковой площади Архангельской области (Shavrina, et al., 2005).



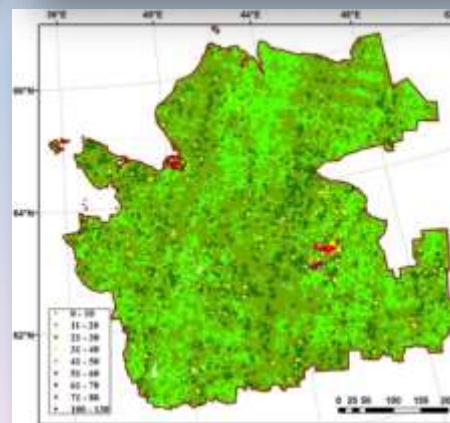
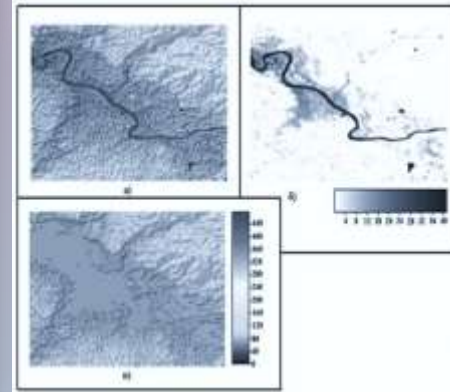
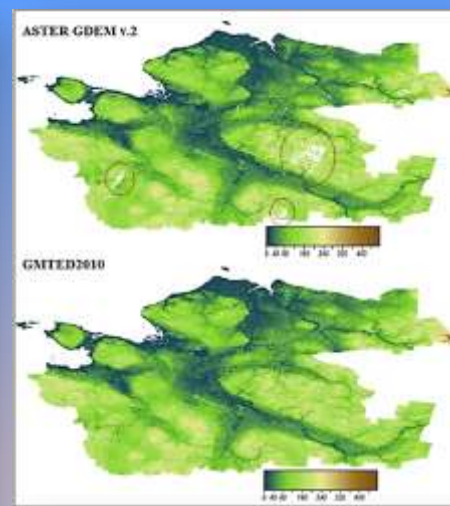


## ЦМР Архангельской области

- Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2; URL: [www.science-education.ru/129-21949](http://www.science-education.ru/129-21949)

- Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и Время, 2015. № 3(21). С. 278-291

- Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 58-67.



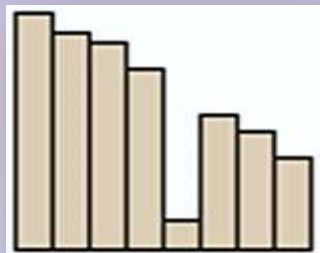
**Заполнение пустот в исходной модели ASTER GDEM v.2 данными GMTED2010**

**Пример заполнения впадин:**  
 а) рельеф;  
 б) высота заполнения;  
 в) рельеф с заполненными впадинами

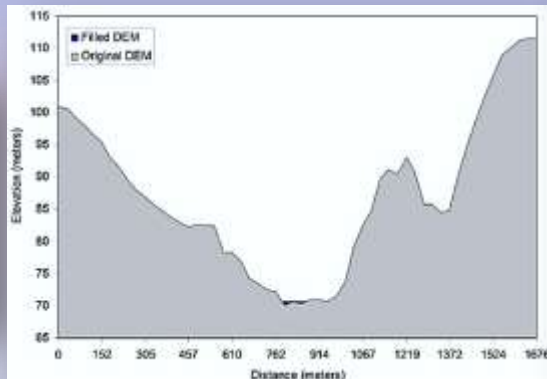
**Абсолютные разности значений высот между данными с ГИС Панорама и ЦМР Архангельской области**



**Впадина («приемник», «локальное понижение»)** – локальный минимум, не имеющий стока вниз по склону ни к одной из смежных ячеек цифровой модели.



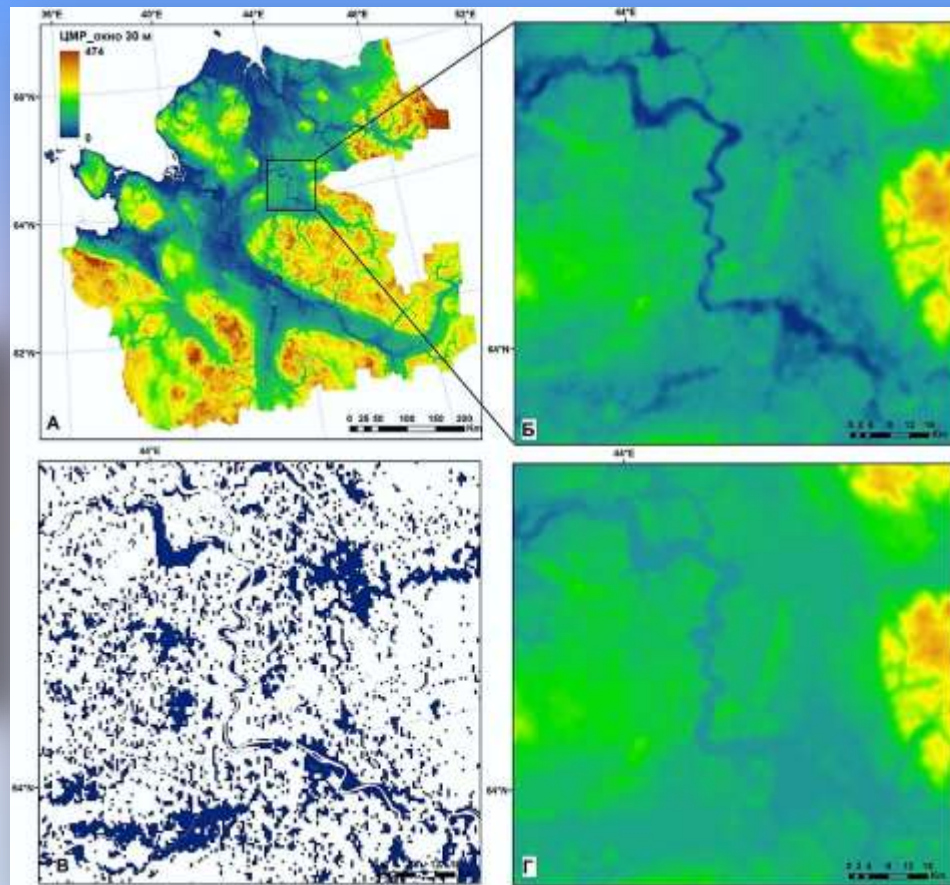
**Профиль локального понижения**



**Профиль высот с заполненными впадинами, по (Zandbergen, 2006)**

Ложные впадины – это недостатки цифровой модели, их наличие обусловлено ошибками входных данных, ошибками интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты (Wang et al., 2006).

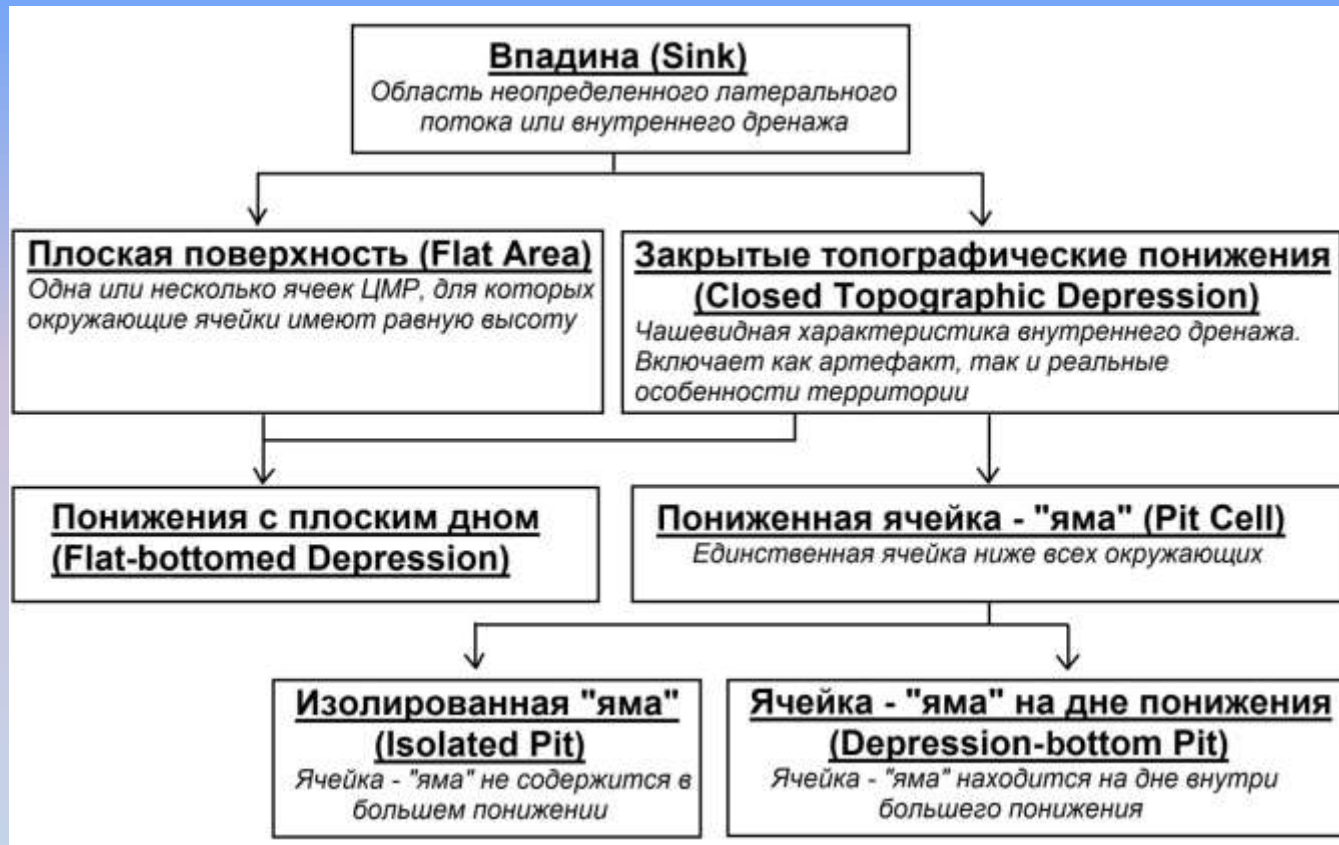
Обнаружение и удаление впадин – важный этап подготовки ЦМР для дальнейшего гидрологического моделирования и анализа.



**Пример работы метода (Wang, Liu, 2006) на реальной поверхности:**

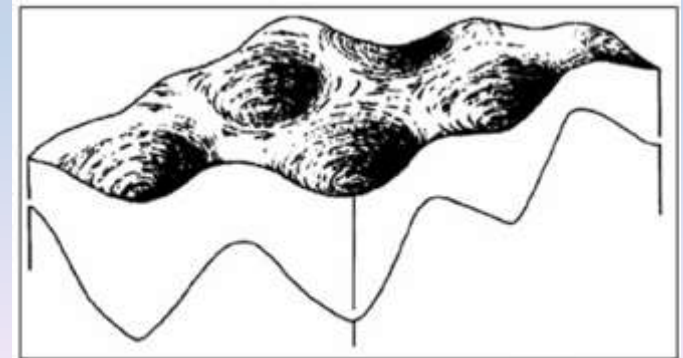
- А) исходная ЦМР Архангельской области,**
- Б) рельеф с впадинами,**
- В) маска впадин,**
- Г) рельеф с заполненными впадинами**

## Топология впадин на ЦМР, по (Lindsay, 2016)



Автор (Lindsay, 2016) отмечает, что в категории «закрытые топографические понижения» следует выделять естественные элементы рельефа.

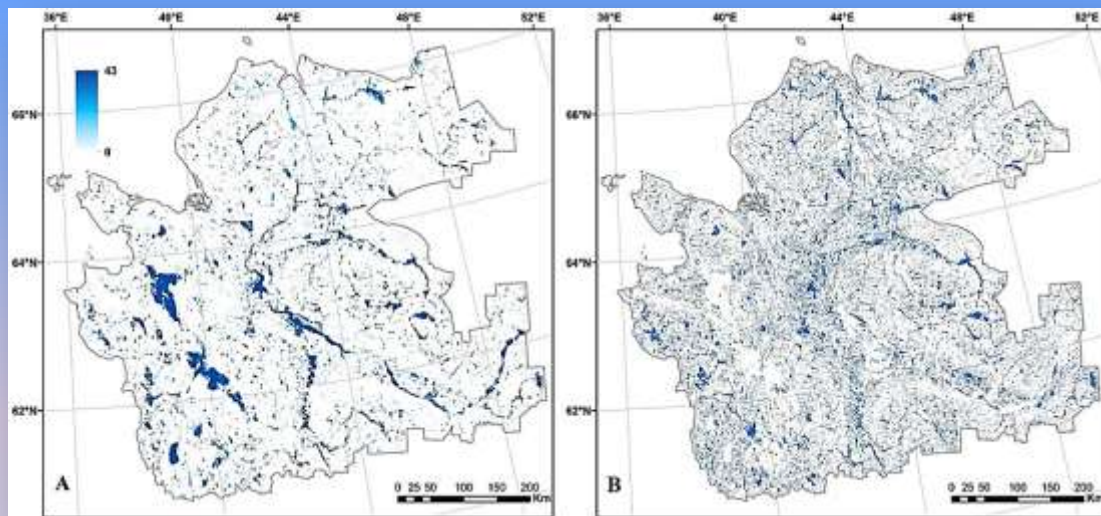
По сути, топографическая поверхность воронок – это поверхность бессточных впадин. Поэтому вполне корректно использовать методы гидрологической коррекции ЦМР для обнаружения локальных карстовых понижений и воронок.



Топографическая поверхность карстовых воронок, по (Климчук и др., 2009)



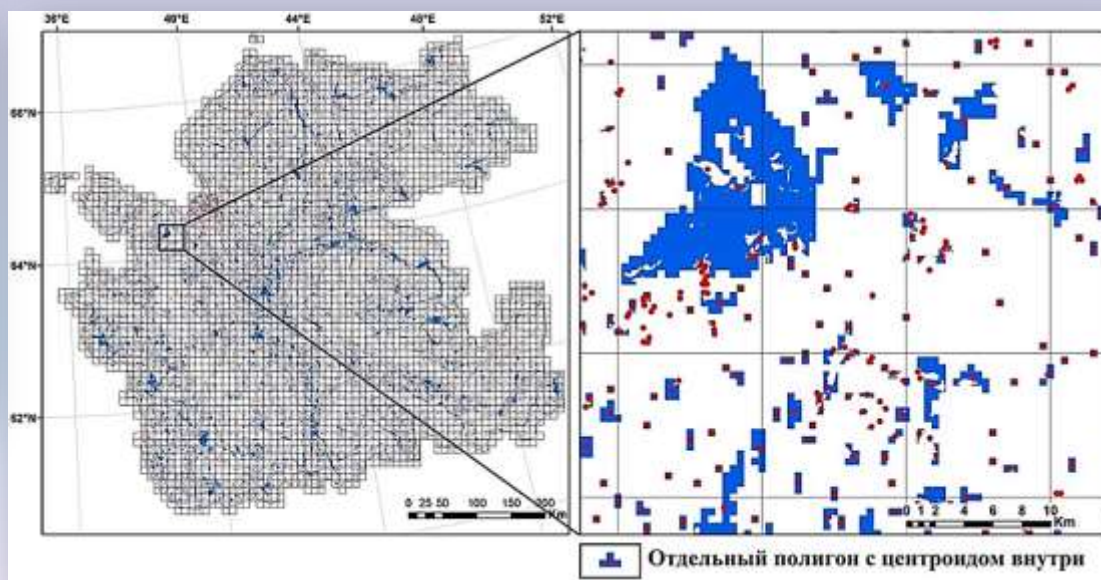
Для заполнения впадин в ЦМР Архангельской области была проведена ее гидрологическая коррекция методом Wang/Liu (наибольшая вычислительная эффективность). Получен растр с заполненными впадинами, из которого вычитался исходный растр. В результате получен растр маски глубины заполнения впадин. Далее, с использованием модуля SAGA GIS Vectorising Grid Classes, маска впадин переведена в векторный формат, из нее вычтены крупные водоемы, речные разливы для отсеечения заведомо известных водных накопителей.



**Глубина заполнения впадин, м (А) и векторизованная маска впадин с удалением крупных водоемов (Б)**

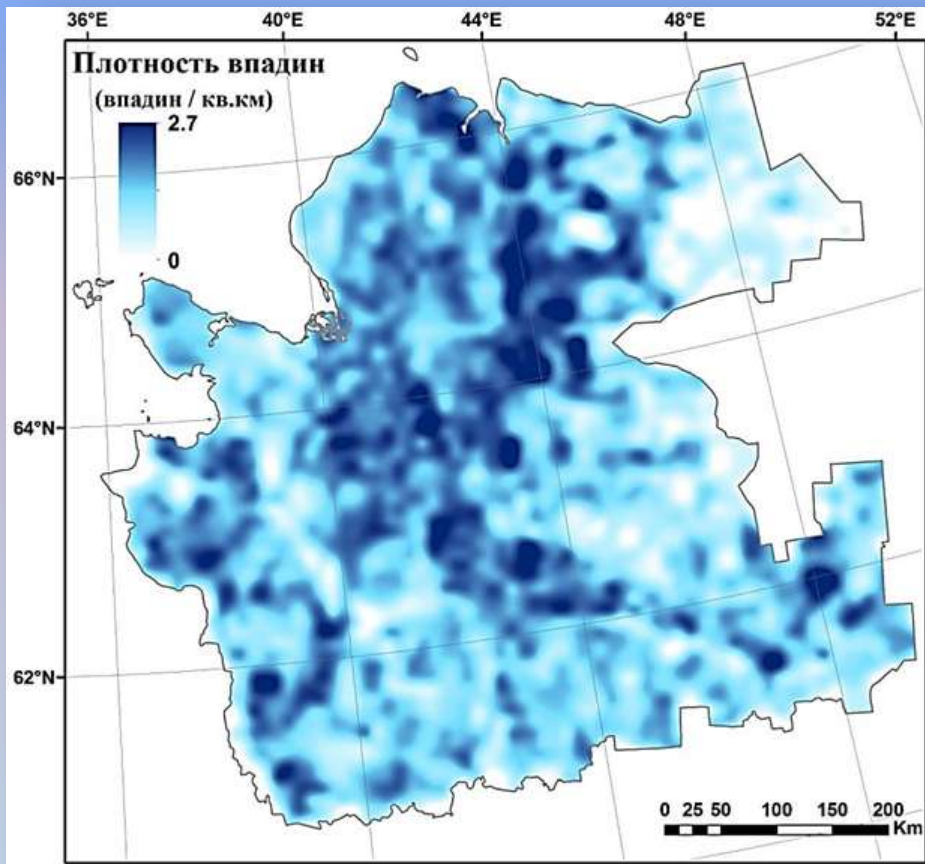


Центриод — это центральная точка каждого отдельного полигона. Чтобы подсчитать количество точечных объектов, вся исследуемая территория разбивалась на квадраты 10×10 км.



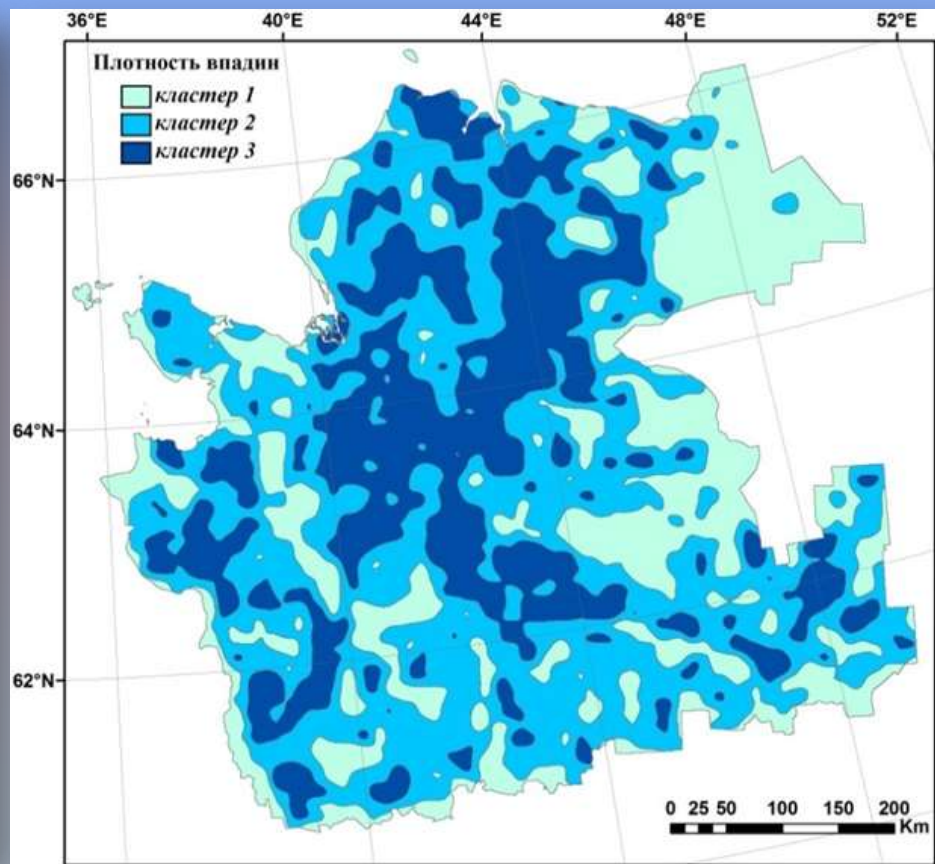
**Разбивка территории на квадраты 10×10 км и построение центриодов**

Значения интерполировались.



## Карта плотности бессточных впадин на единицу площади

(получена интерполяцией с применением модуля *Resampling*  
методом *B-spline* в *SAGA GIS*)



## Результат кластерный анализа плотности бессточных впадин

**1 – минимальные**

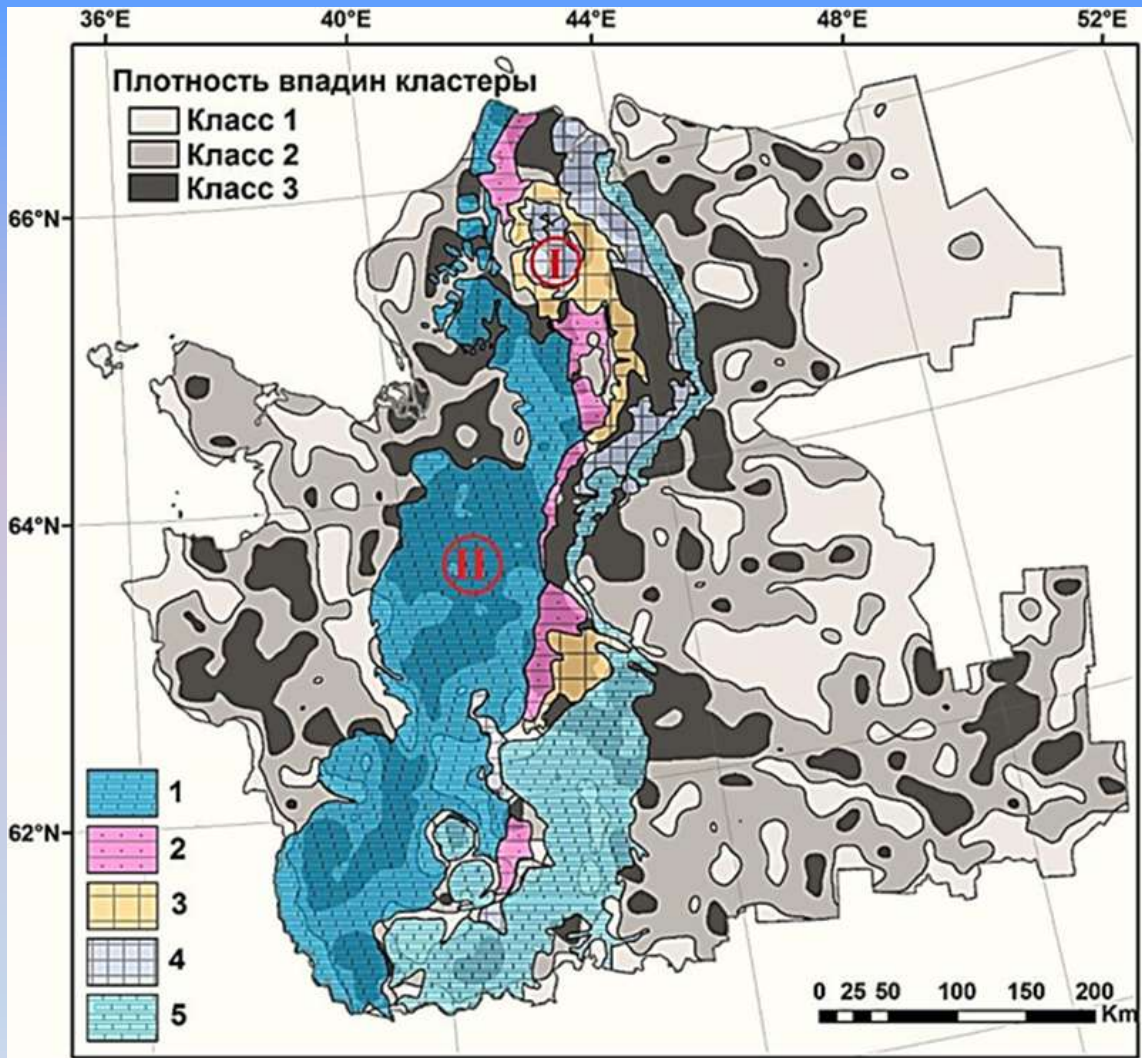
**2 – средние**

**3 – максимальные значения**



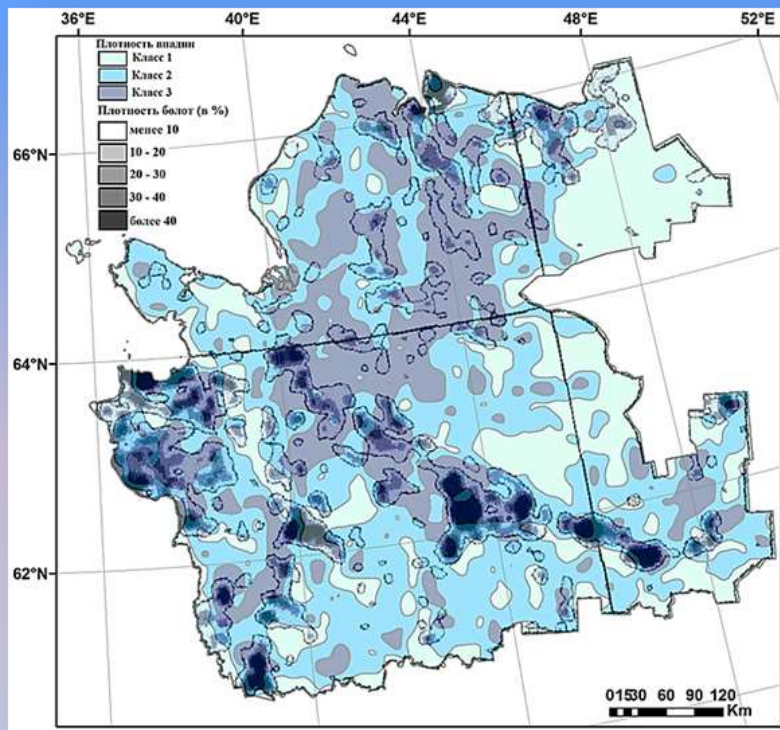
**Зона I** – правобережье р. Северной Двины, территория Двинско-Мезенской карстовой провинции. Отмечается малая мощность четвертичных отложений и большее, по сравнению с остальной частью области, проявление открытого карста. Участки максимального развития открытого карста (долина р. Сотки в Пинежском заповеднике) соответствуют невысокой плотности бессточных впадин, т.к. здесь происходит непосредственное поглощение атмосферных осадков обнаженной карстовой поверхностью. Здесь резко сокращается площадь болот – от общей плотности по области в 35-40 % до 3-5 %.

**Зона II** – левобережье р. Северной Двины, территория Онего-Двинской карстовой провинции. Отмечается значительная мощность четвертичных отложений и в большей степени развитие покрытого карста. Карстующиеся породы подвергаются воздействию, главным образом, подземных вод. Здесь отмечается максимальная плотность болот, поскольку по территории карстования повсеместно развитие замкнутых депрессий в виде карстовых воронок и понижений в рельефе.



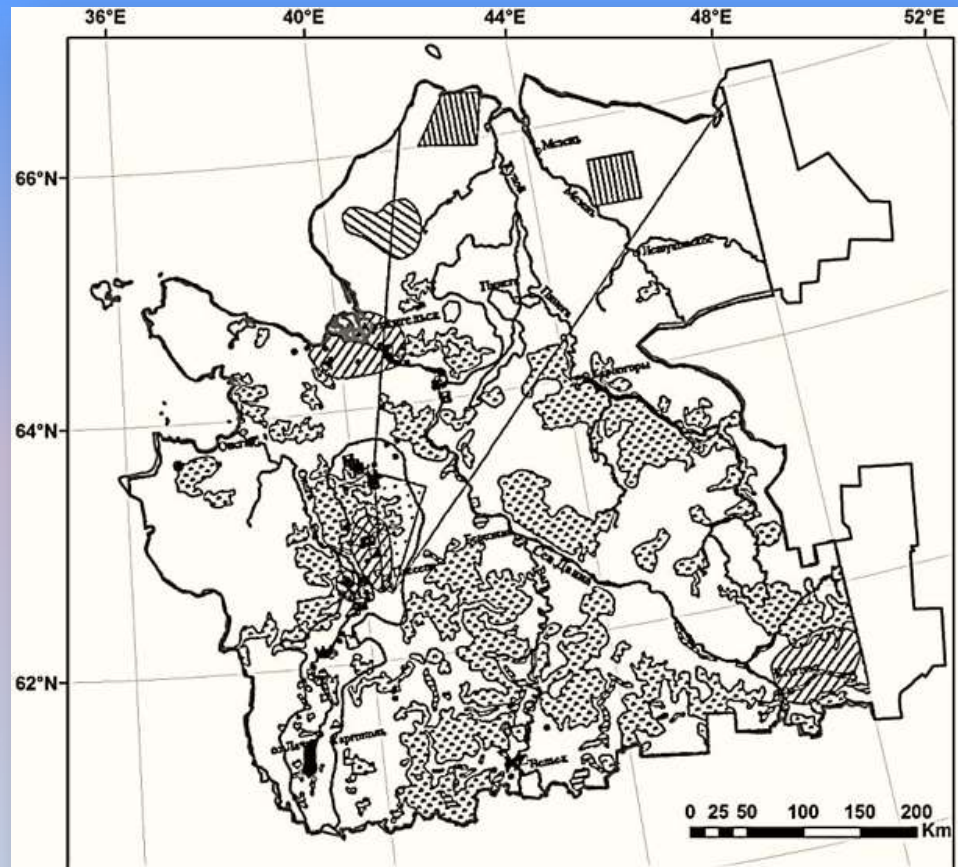
1 – карбонатные породы среднего и верхнего карбона и ассельского яруса нижней перми; 2 – сульфатно-карбонатные породы сакмарского яруса нижней перми; 3 – терригенно-сульфатные породы уфимского яруса верхней перми; 4 – карбонатно-терригенные породы нижнеказанского яруса верхней перми; 5 – карбонатные породы верхнеказанского яруса верхней перми

## Кластерные значения плотности бессточных впадин и распространение карстующихся пород на территории Архангельской области



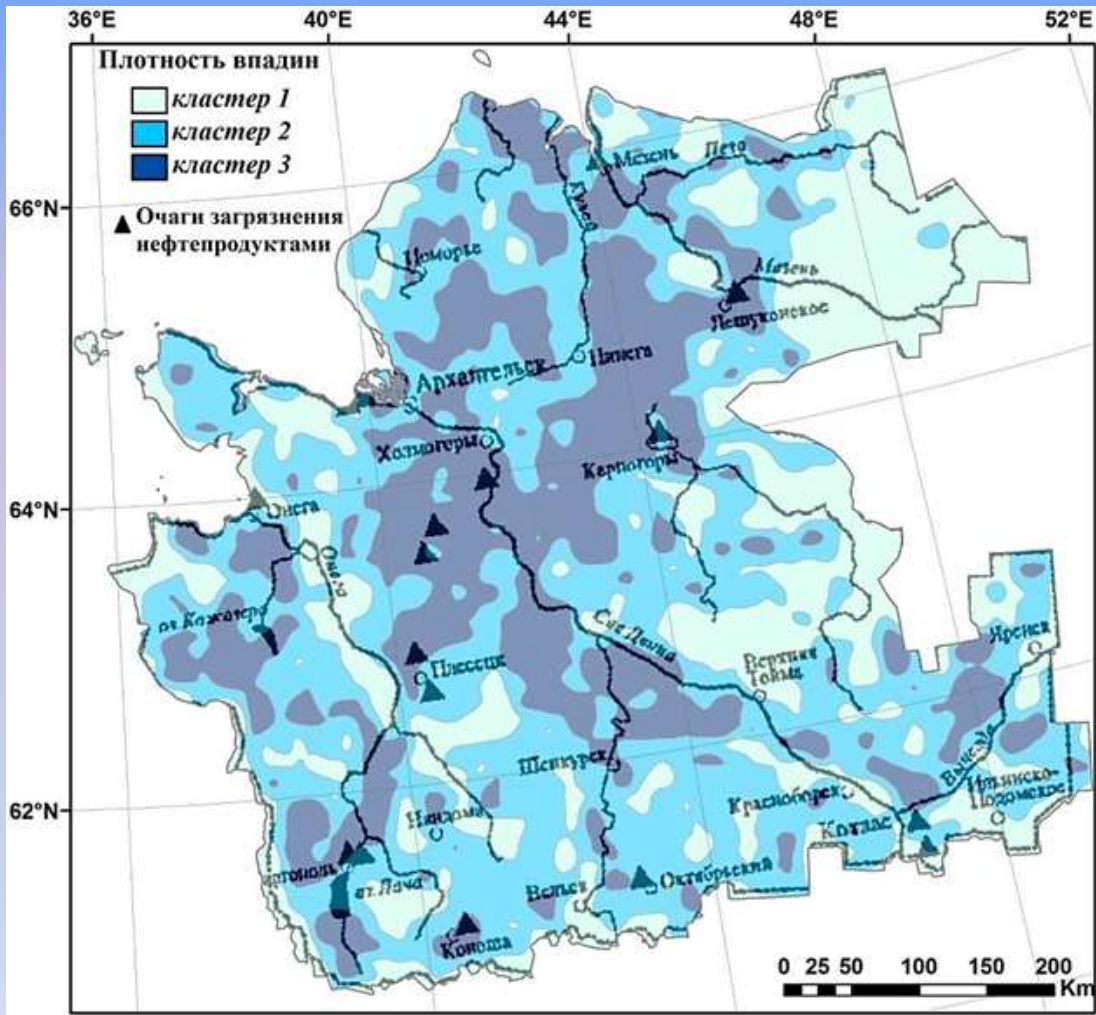
Плотность бессточных впадин и плотность болот на территории Архангельской области

С точки зрения вероятности активизации карстовых процессов, вторая зона представляет большую опасность, по сравнению с первой, поскольку именно здесь располагаются основные объекты техногенного загрязнения.



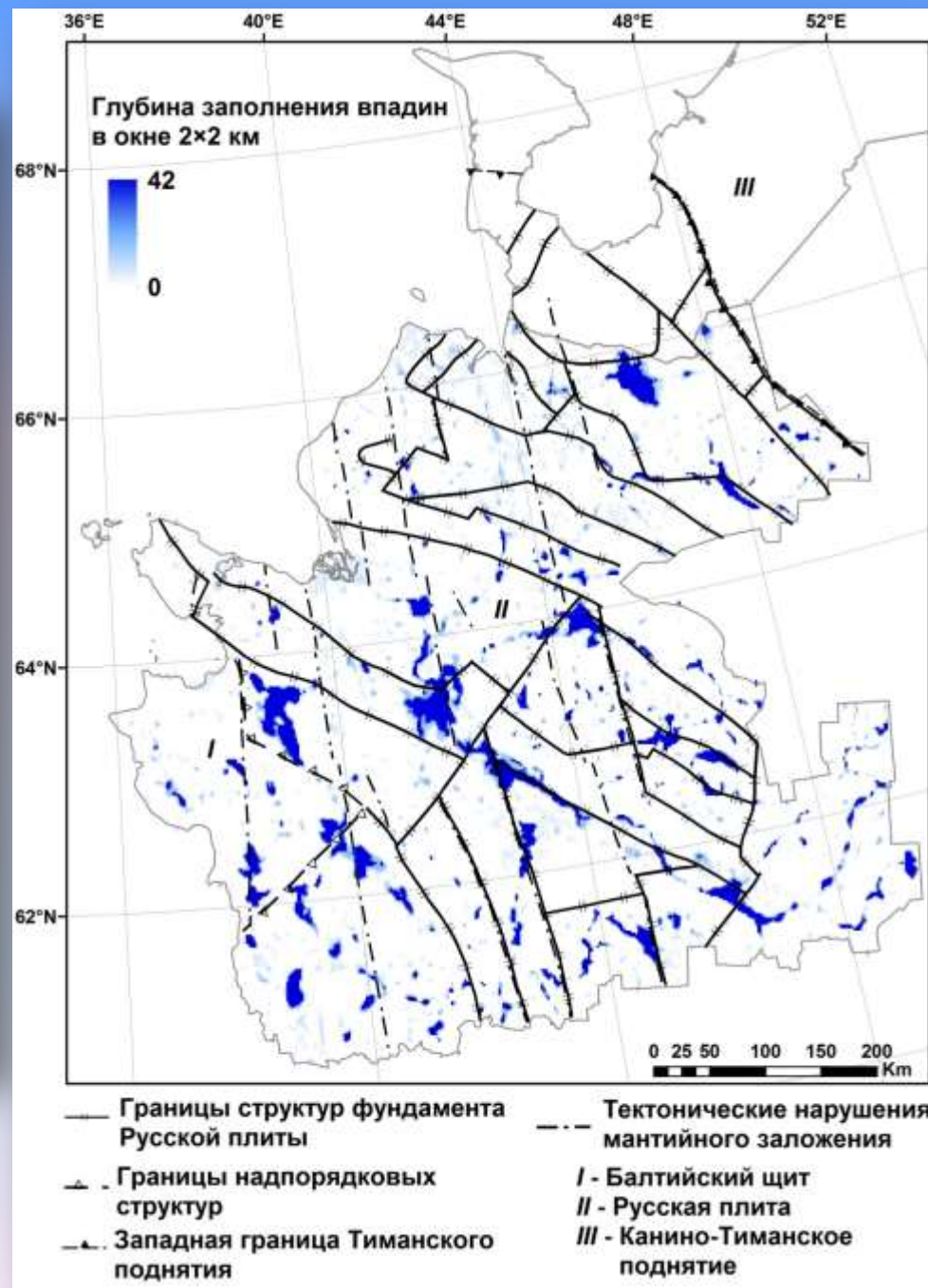
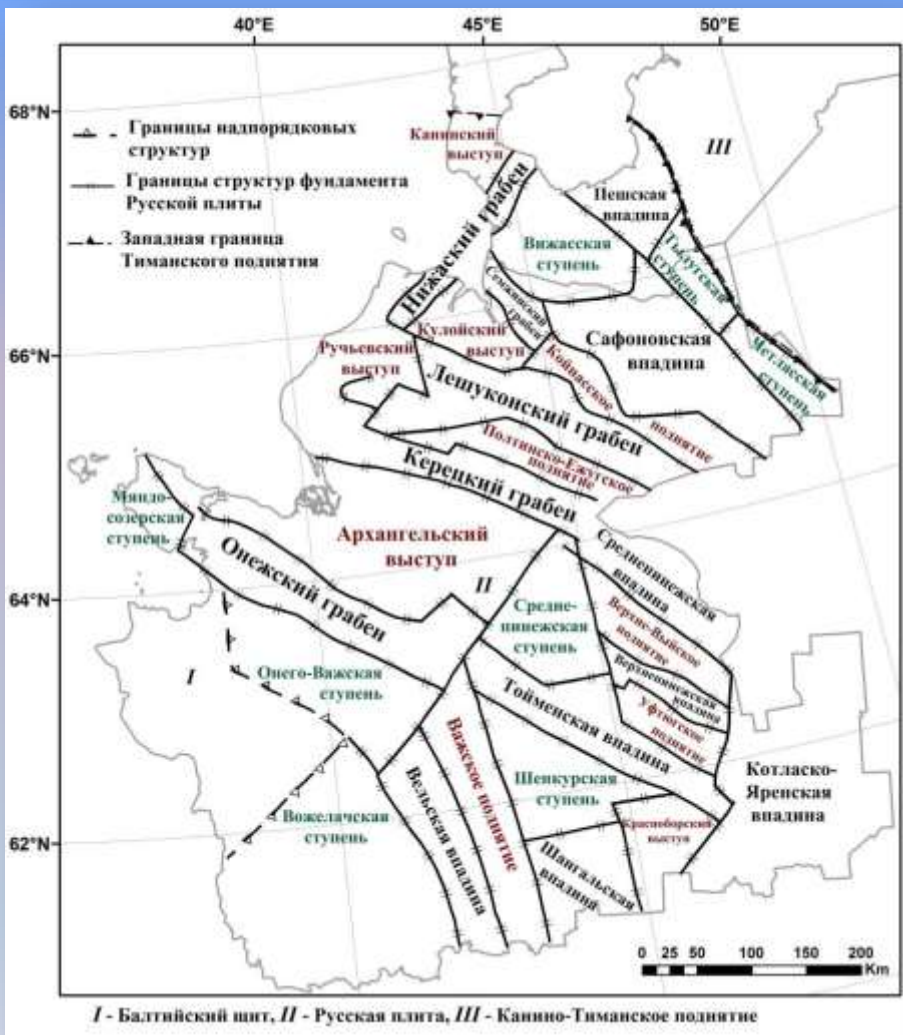
Объекты техногенного загрязнения Архангельской области, по (Губайдуллин, 2002)





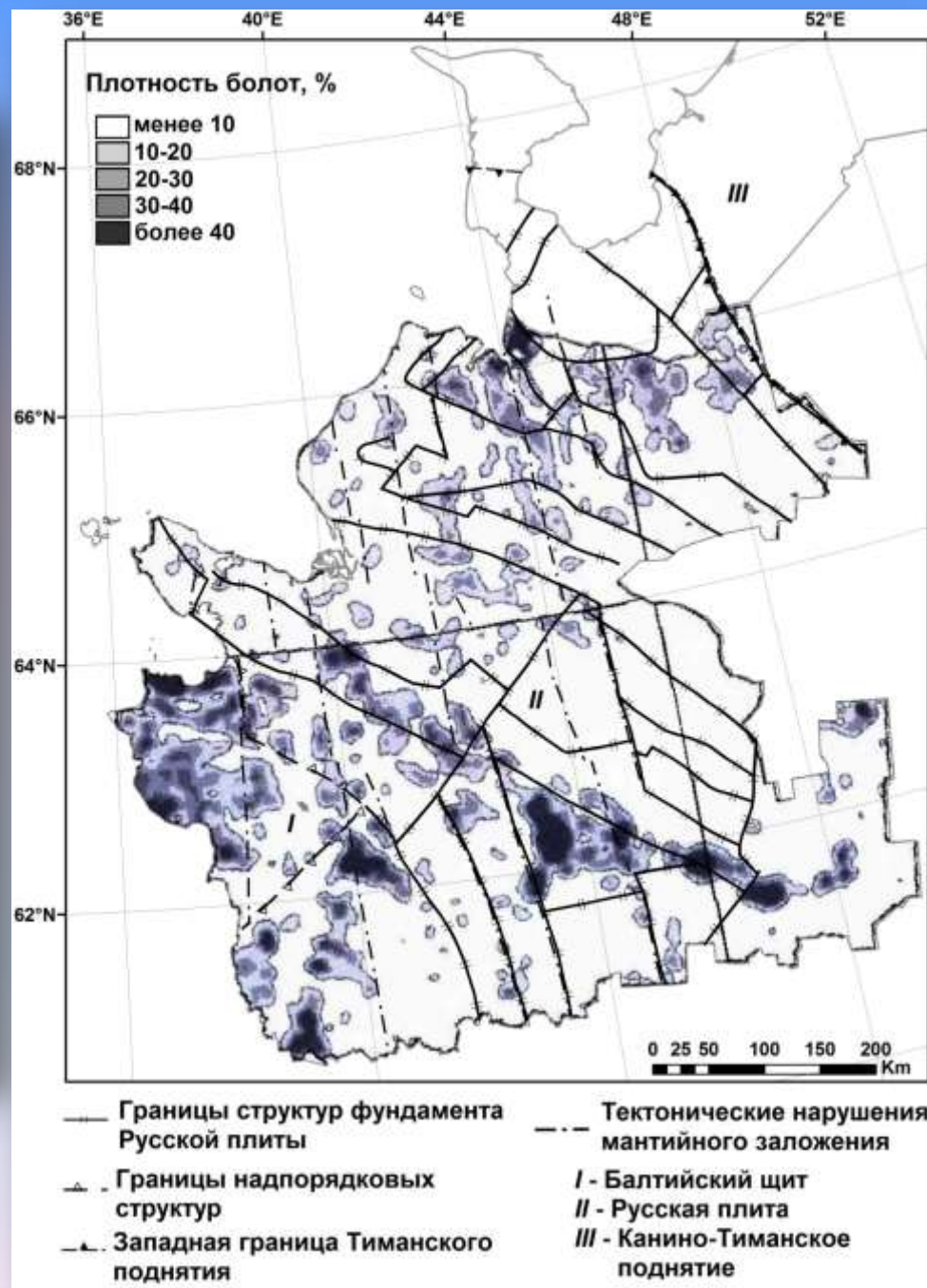
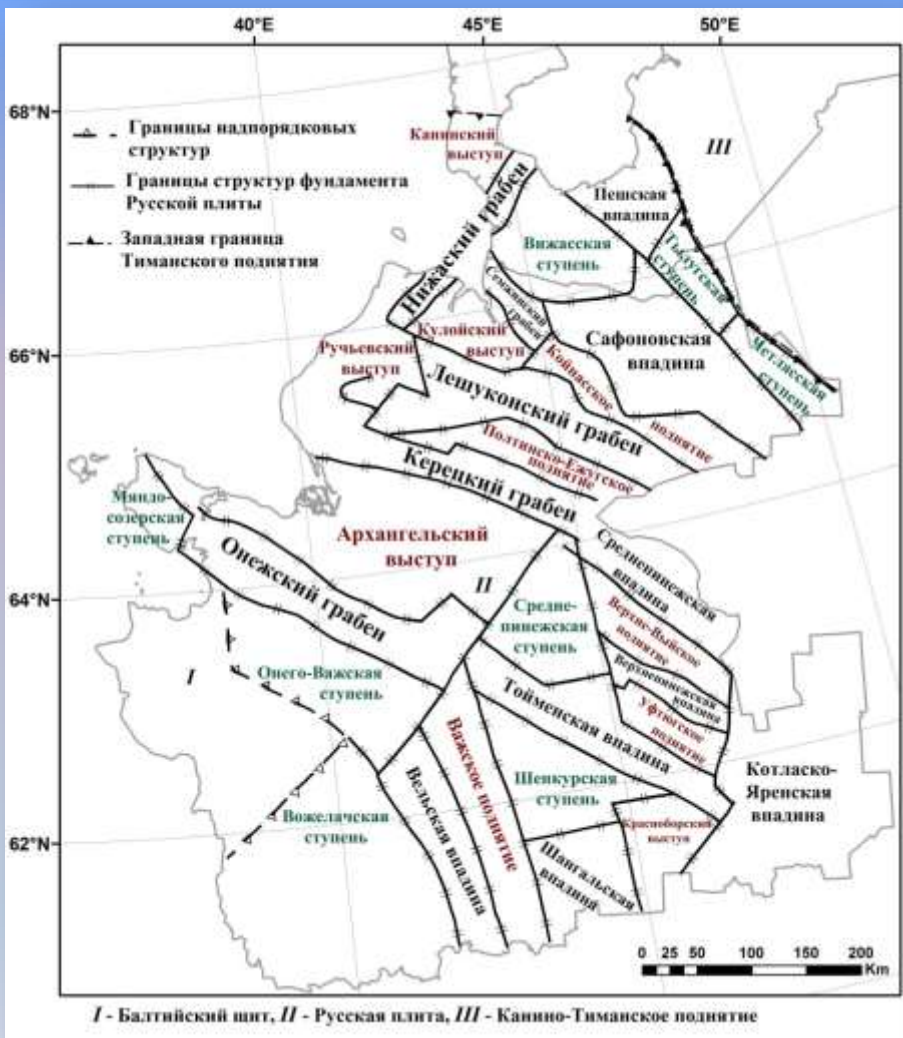
Согласно (Губайдуллин, 2002), установлено локальное загрязнение грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами на ряде объектов хранения, переработки, транспортировки нефти и нефтепродуктов на территории Архангельской области. Пространственное распределение очагов загрязнения положительно коррелирует с максимальной плотностью бессточных впадин, что крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории.

**Очаги загрязнения грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами  
(Губайдуллин, 2002)**



## Основные структуры фундамента Русской плиты (в границах Архангельской области)





**Основные структуры фундамента Русской плиты (в границах Архангельской области)**

## **Выводы:**

- Метод обнаружения бессточных впадин, используемый при гидрологической коррекции ЦМР с целью устранения ошибок, может быть применен для выделения зон вероятной активизации карстового процесса. Полученный вывод особенно актуален для лесопокрытых северных территорий с возрастающей антропогенной нагрузкой.

- Максимальная плотность бессточных впадин приходится на территории с развитием карбонатного покрытого и погребенного карста. Данный вывод важен, поскольку выявление развития карстового процесса сложно, т.к. на начальных этапах процесс протекает под землей и только позднее проявляется на дневной поверхности. Максимальная плотность бессточных впадин может быть использована для выявления начального этапа развития карстового процесса.

- Пространственное совпадение максимальной плотности бессточных впадин с источниками промышленного загрязнения крайне негативно сказывается на экологическом состоянии территории, поскольку происходит накопление и поступление загрязняющих веществ в неустойчивую к внешнему воздействию геологическую среду.



A scenic view of a forest on a rocky hillside. The foreground and middle ground are filled with dense green coniferous trees. In the background, a rocky cliff face is visible, partially covered by more trees. The sky is bright blue with scattered white clouds.

**Спасибо за внимание!**