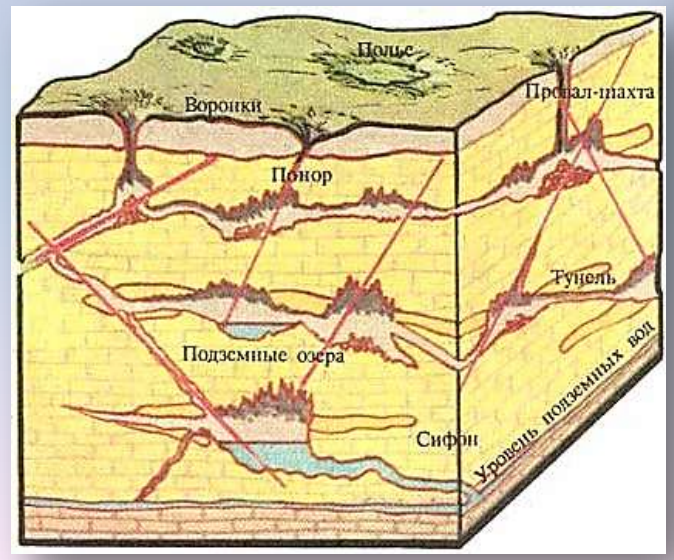
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова УрО РАН, г. Архангельск

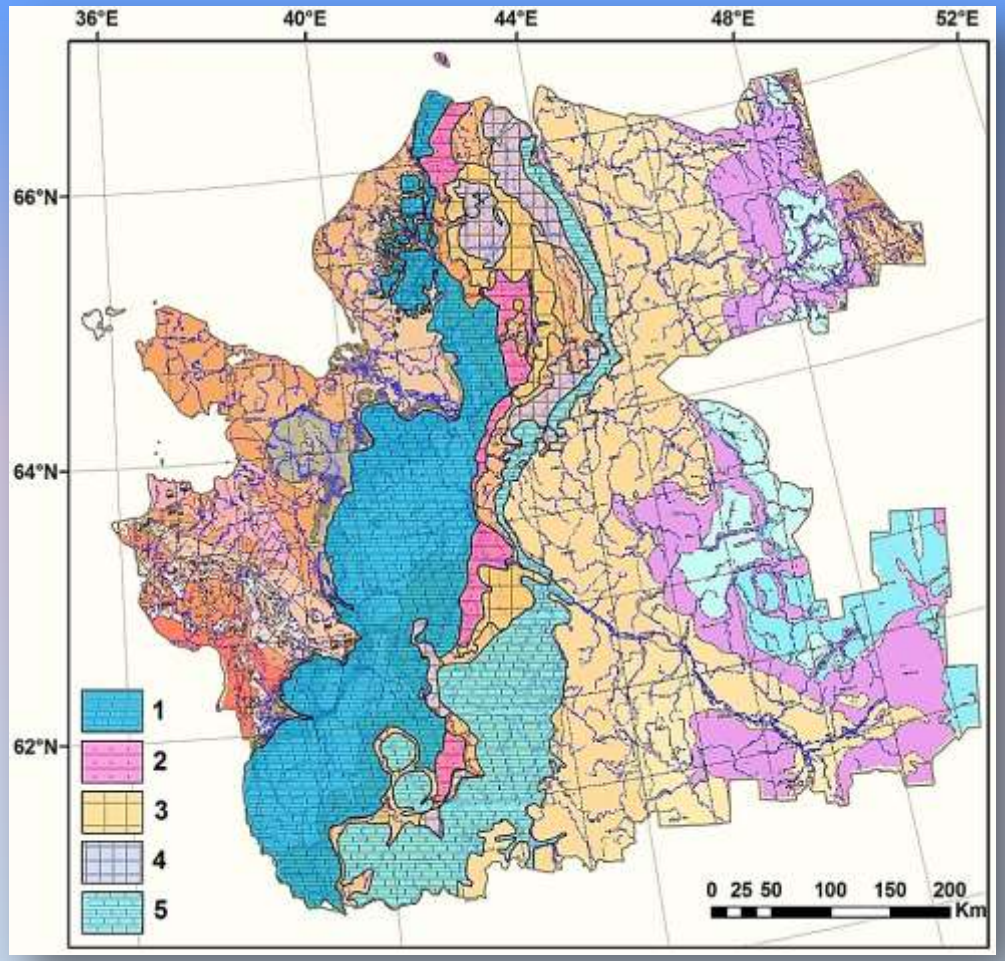
Геоморфометрический анализ рельефа в изучении карстового процесса

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

Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2023 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^2, что составляет 32,4 % от материковой площади Архангельской области (Shavrina, et al., 2005).

Спрогнозировать вероятность активизации карстового процесса весьма затруднительно, поскольку на начальных этапах процесс протекает под землей и только позднее проявляется на дневной поверхности. Тем не менее, проявления экзогенной геодинамики, наблюдаемые на территории Архангельской области и сопутствующие развитию карстового процесса, служат индикаторами современной активности карста.

В сентябре 2020 года в Виноградовском районе Архангельской области, в километре от деревень Скобели и Задориха, образовалась карстовая воронка диаметром 13 и глубиной 24 м

Карстовая воронка в Виноградовском районе Архангельской области

(фото с сайта https://29.ru/text/incidents/69488615/)

Местоположение воронки на космоснимке с сервиса Google Earth
до ее образования и на сегодняшний день

За неделю до этого события жители деревни Кузомень Холмогорского района Архангельской области отмечали появления ям диаметром 1-2 и глубиной 2-3 м прямо на их участках, за огородами напротив деревни, рядом с тропинками, по которым ходят люди и скот (URL:https://29.ru/text/incidents/69480887/). Небольшие ямы жители Кузомени засыпают сами, но с глубокими уже не справляются .

Карстовая воронка в Холмогорском районе

(фото с сайта https://29.ru/text/incidents/69480887/)

29 июня 2023 г. на 987 километре федеральной автодороги М-8 , в районе деревни Уйта Виноградовского округа, произошел карстовый провал. Движение было ограничено для всех видов транспорта.

Карстовая воронка на федеральной трассе М-8

(фото с сайта https://region29.ru/2023/06/30/649e688eae980a2bd917d982.html)

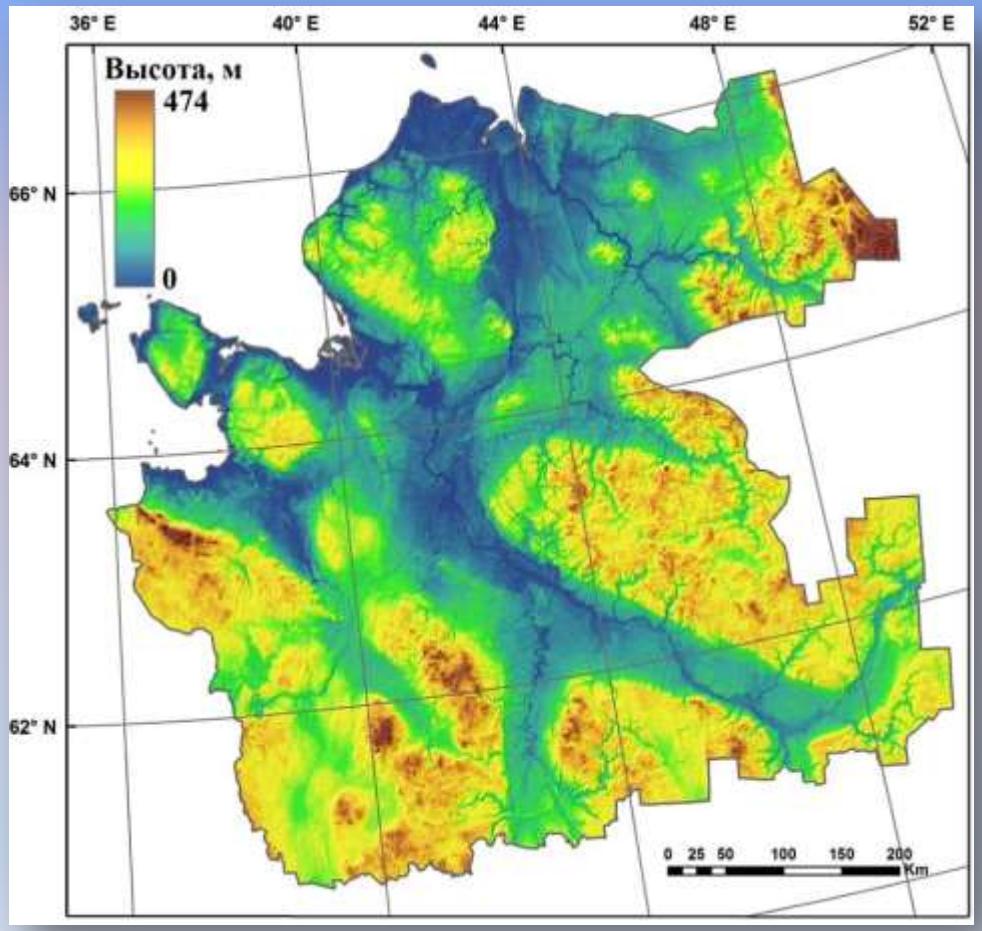
Пример карстовой воронки со сменой хвойной растительности
на лиственную и кустарниковую

Пример карстовой воронки со сменой кустарничковой растительности на травянистую (понижение выполнено хвощем лесным)

Пример небольшого карстового понижения
(смена кустарничковой растительности на моховую)

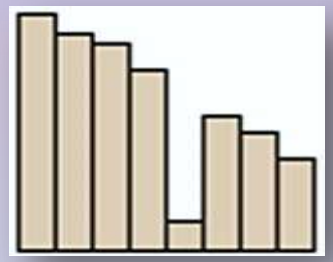
В этой связи изучение, мониторинг и, главное, предсказание вероятности активизации карстового процесса является важной и актуальной современной задачей. Вместе с тем, труднодоступность северных территорий страны из-за отсутствия дорог и развитой инфраструктуры создают большие сложности при изучении карстовых процессов обычными натурными способами.

Малоэффективность аэро- и космосъемки обусловлена наличием лесного покрова. Цифровое моделирование рельефа, как один из продуктов космической деятельности, в данном случае дает возможность проведения объективной дистанционной оценки обширных территорий одновременно, используя геоморфометрический аппарат и логические процедуры.

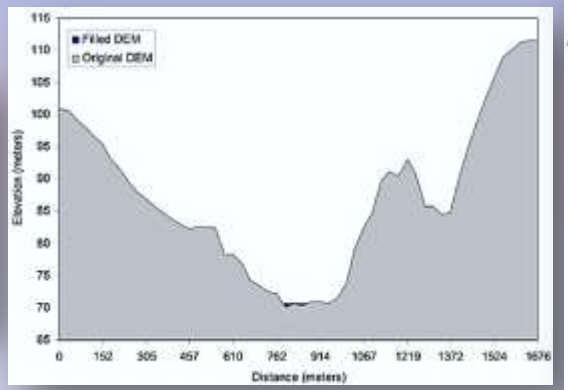


ЦМР Архангельской области

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



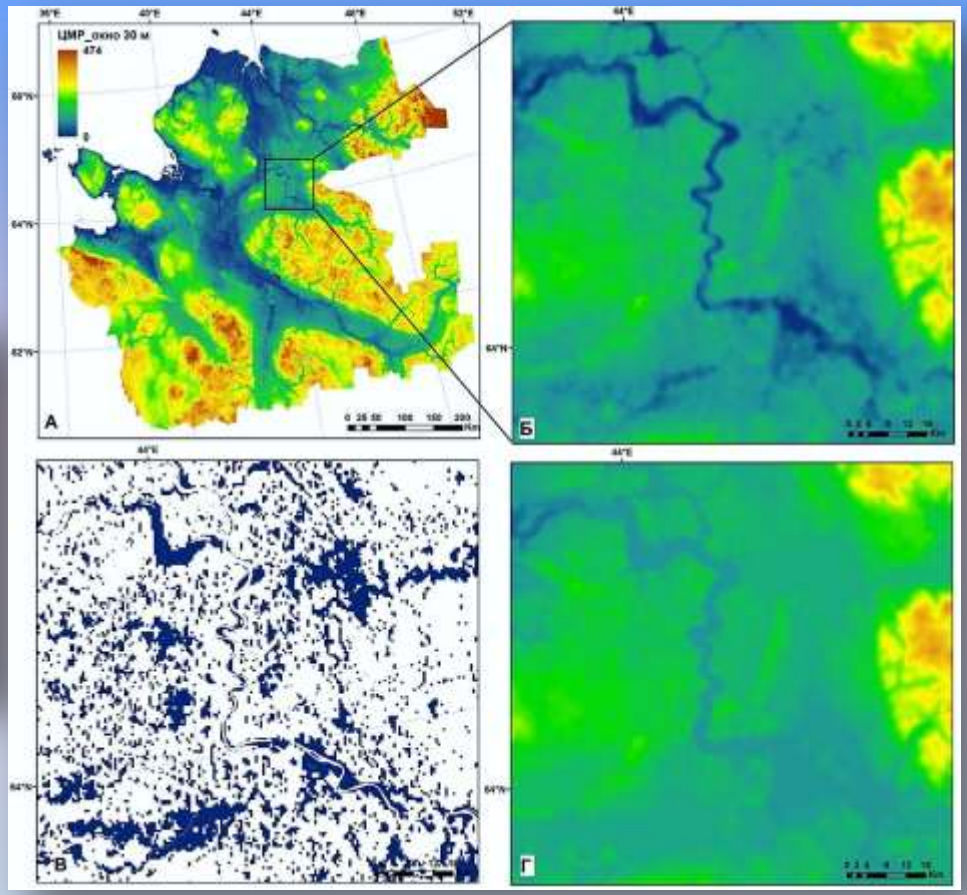
Профиль локального понижения



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:

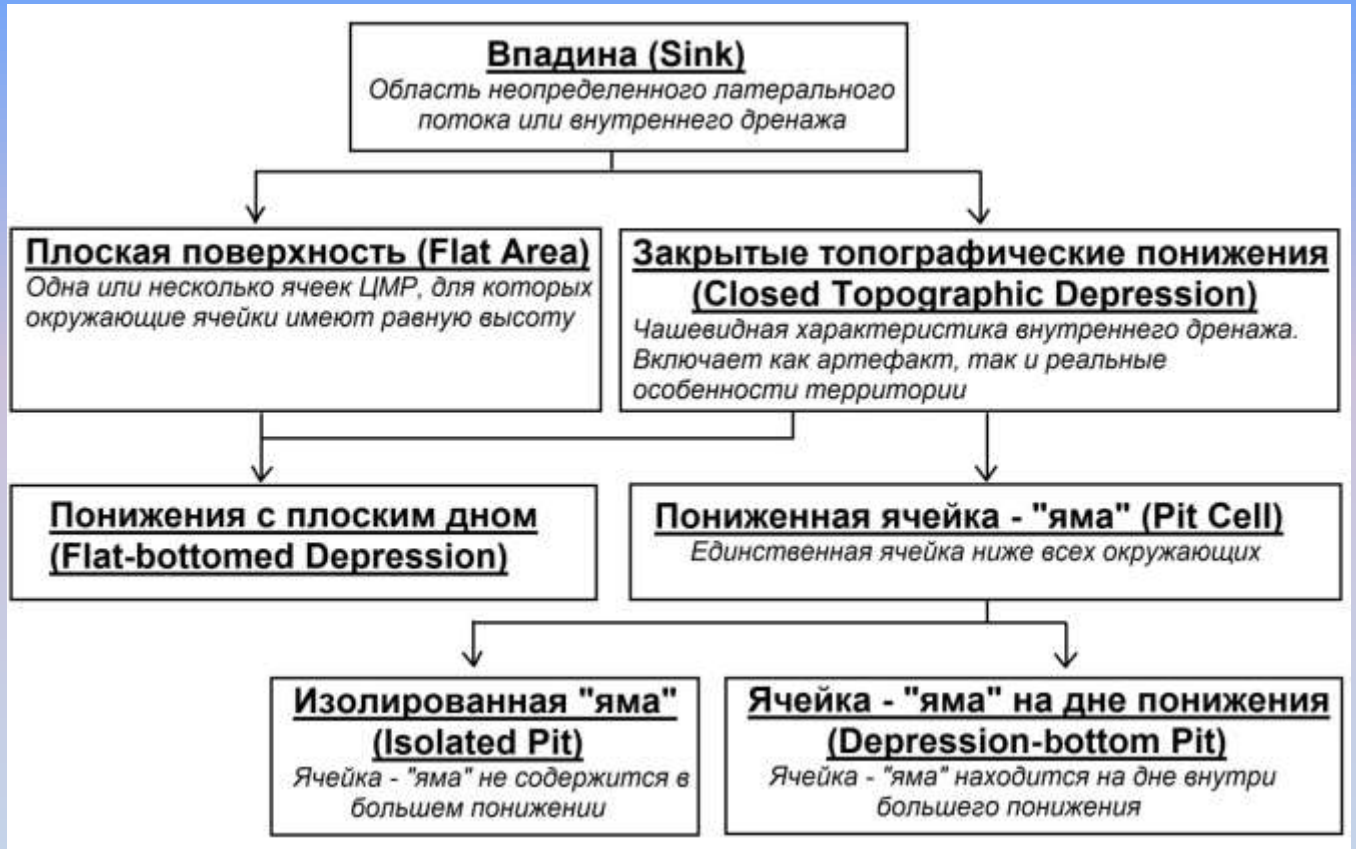
А) исходная ЦМР Архангельской области,

Б) рельеф с впадинами,

В) маска впадин,

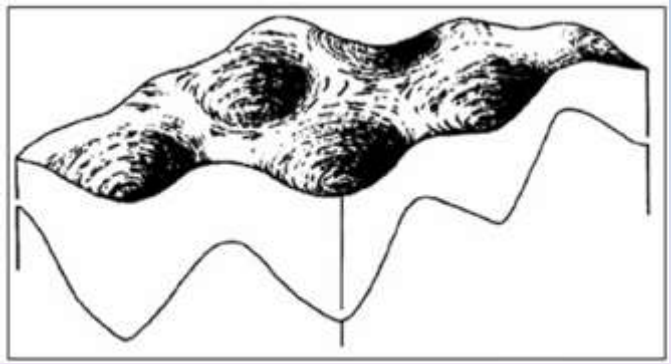
Г) рельеф с заполненными впадинами

Топология впадин на ЦМР, по (Lindsay, 2016)



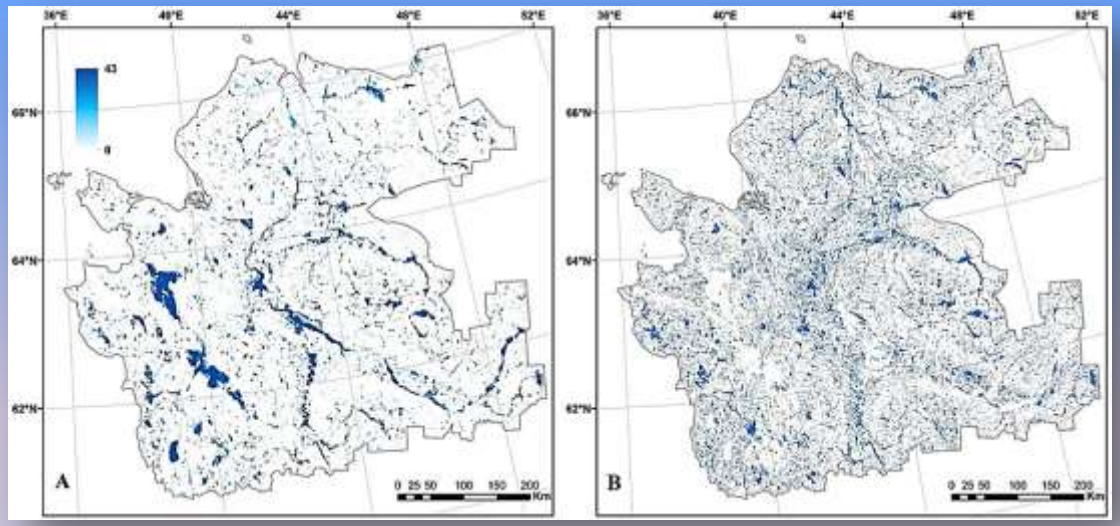
Автор (Lindsay, 2016) отмечает, что в категории «закрытые топографические понижения» следует выделять естественные элементы рельефа.

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)

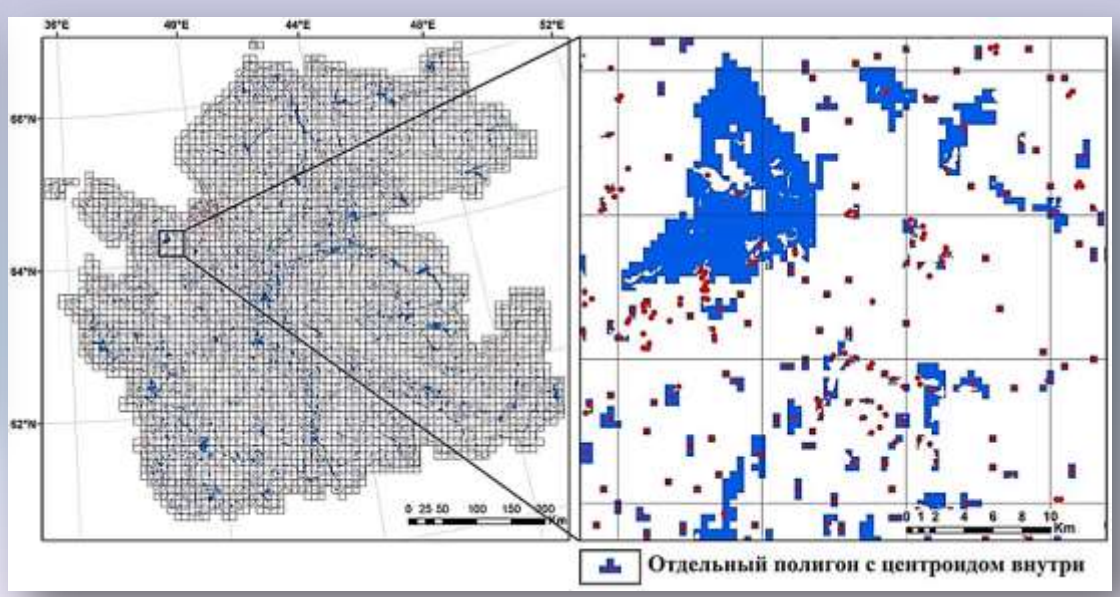
Для заполнения впадин в ЦМР Архангельской области была проведена ее гидрологическая коррекция методом Wang/Liu (наибольшая вычислительная эффективность). Получен растр с заполненными впадинами, из которого вычитался исходный растр. В результате получен растр маски глубины заполнения впадин. Далее, с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



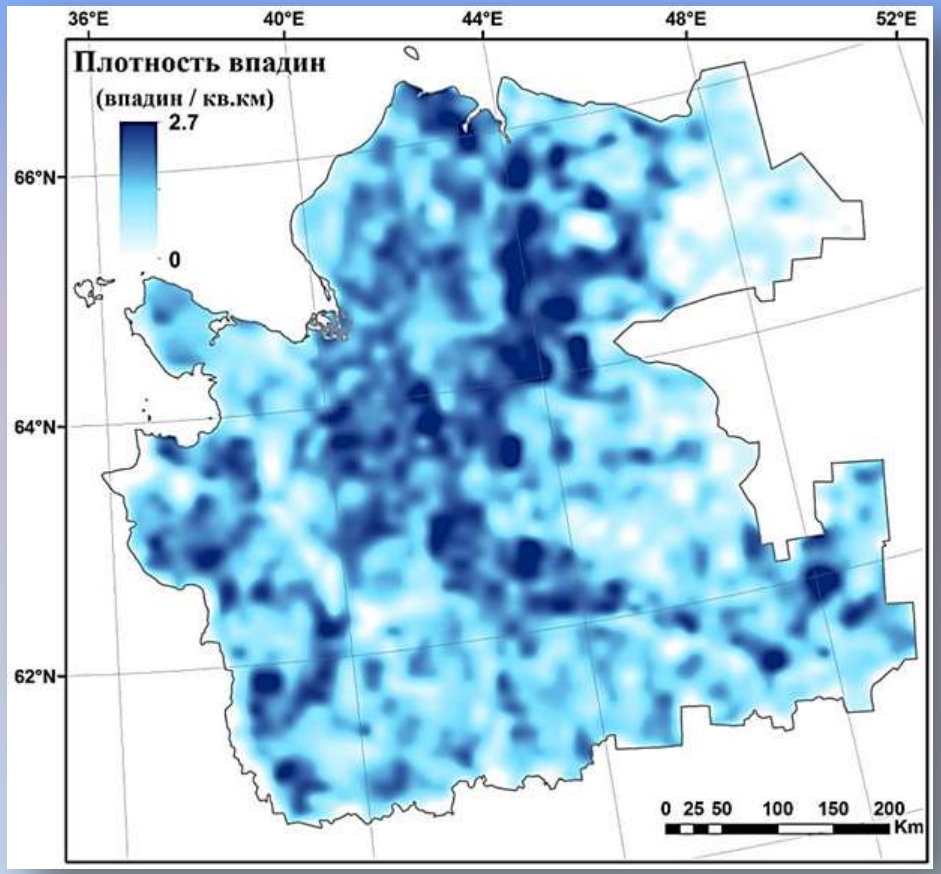
Глубина заполнения впадин, м (А) и векторизованная маска впадин с удалением крупных водоемов (Б)

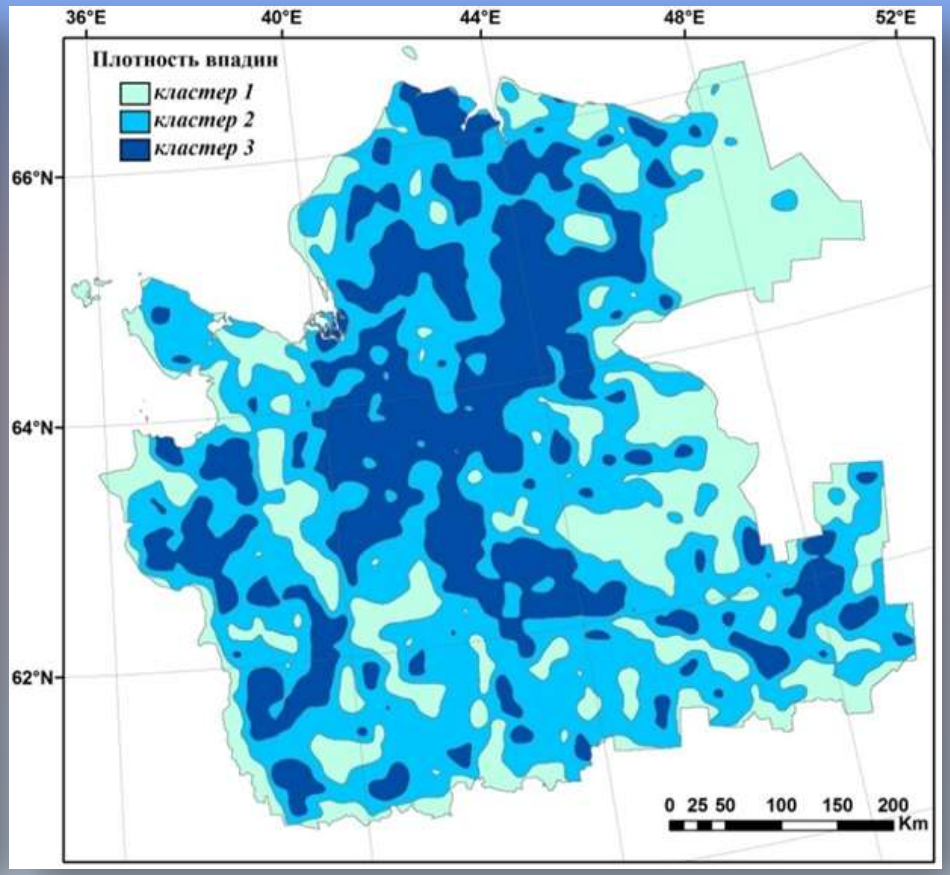
Центроид – это центральная точка каждого отдельного полигона. Чтобы подсчитать количество точечных объектов, вся исследуемая территория разбивалась на квадраты 10×10 км.

Значения интерполировались.



Разбивка территории на квадраты 10×10 км и построение центроидов





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

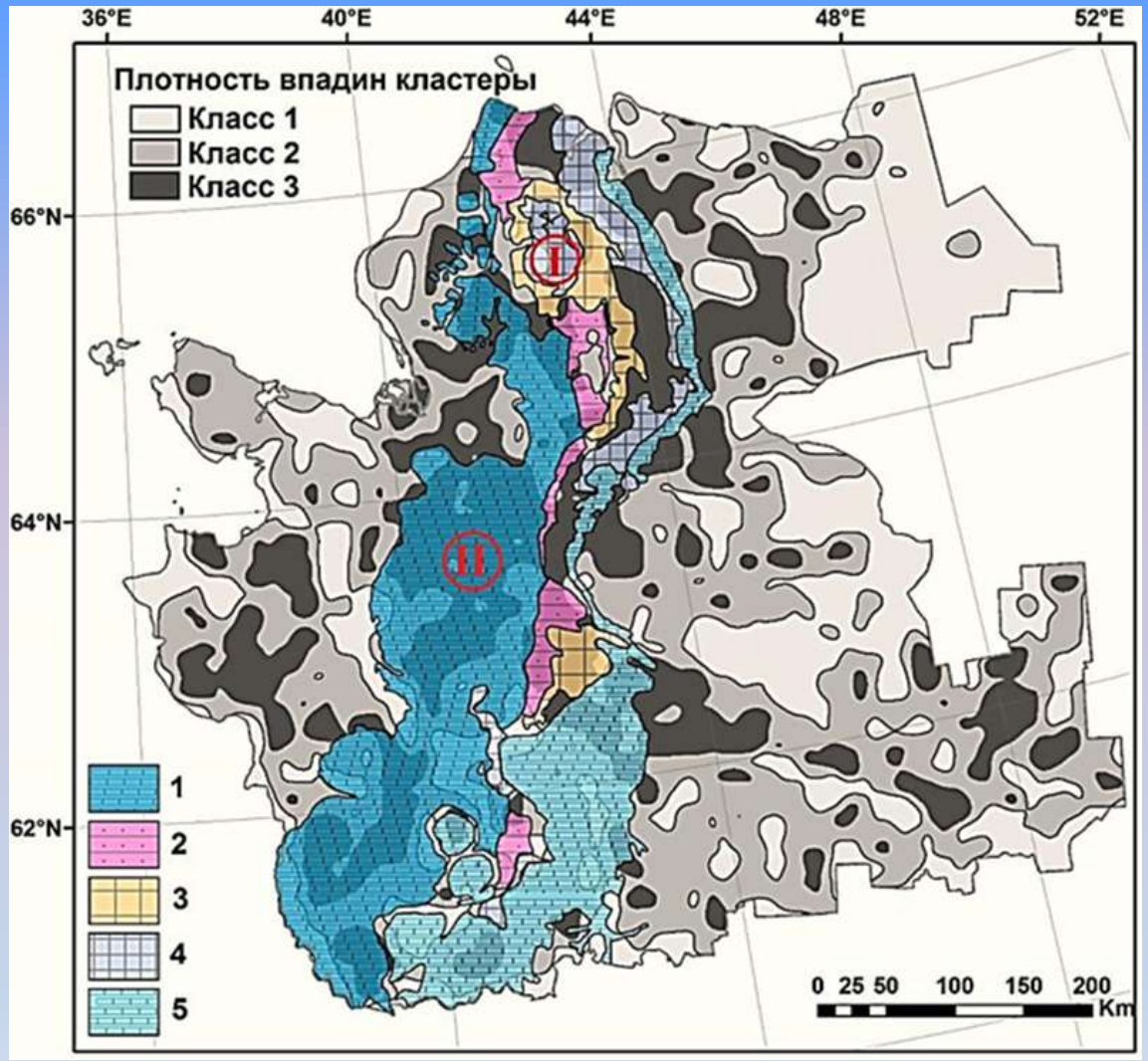
1 – минимальные

2 – средние

3 – максимальные значения

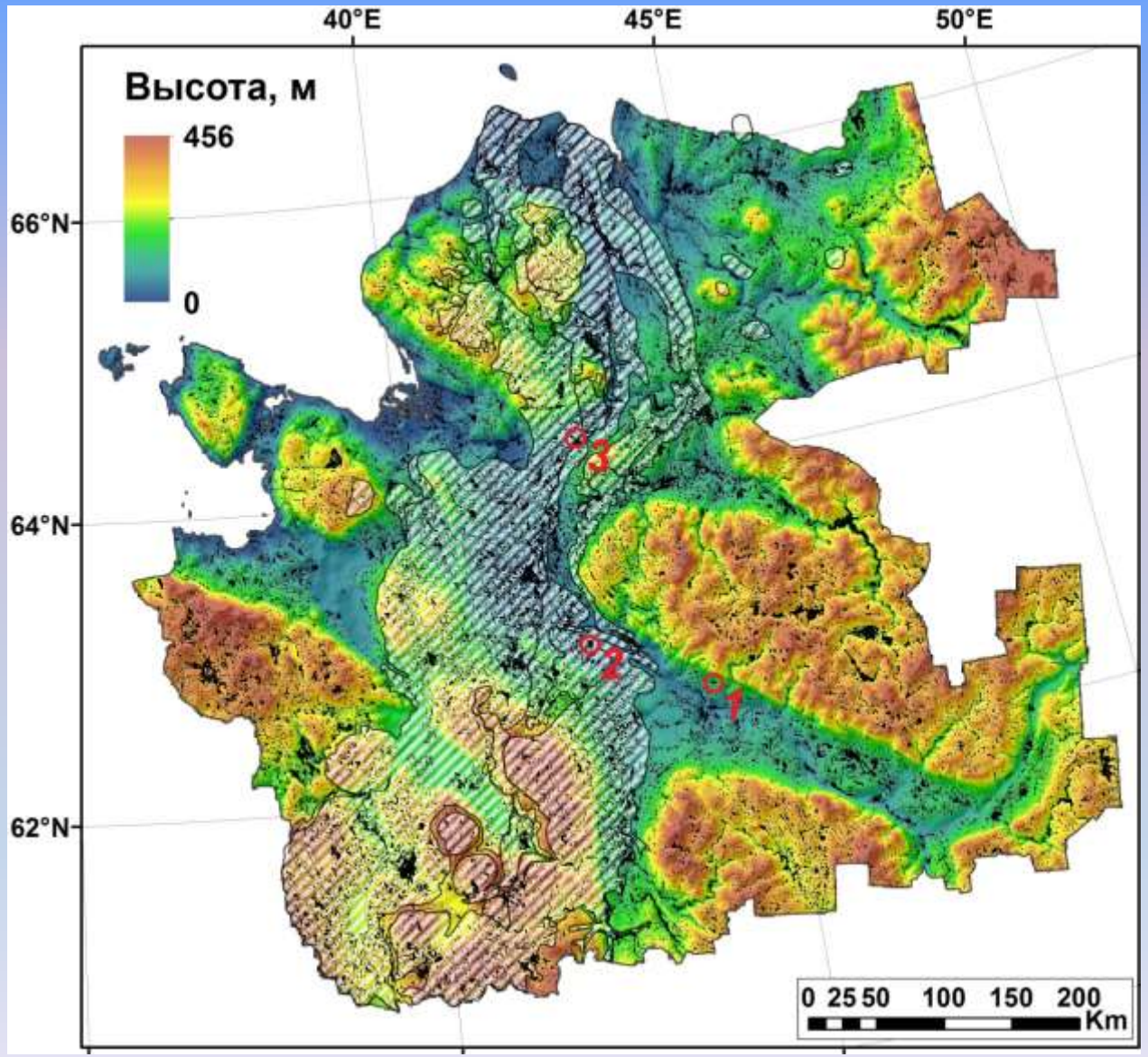
Вывод:

Метод обнаружения бессточных впадин, используемый при гидрологической коррекции ЦМР с целью устранения ошибок, может быть применен для выделения зон вероятной активизации карстового процесса.



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

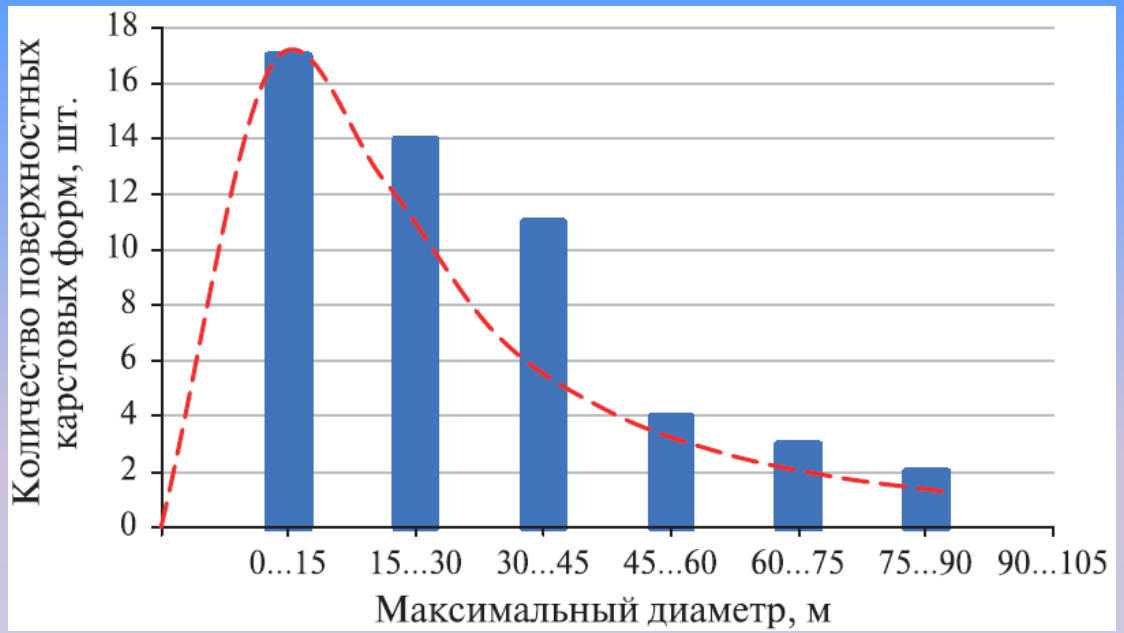
Кластерные значения плотности бессточных впадин и распространение карстующихся пород на территории Архангельской области



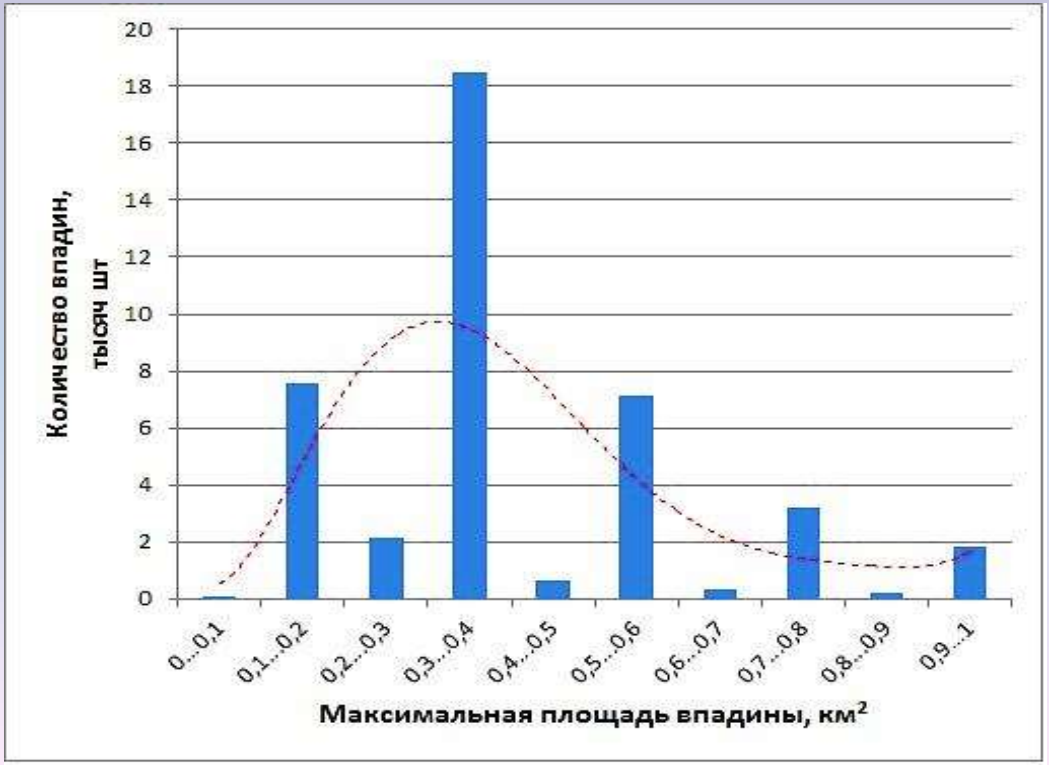
1 – карстовая воронка у дер. Скобели и Задориха (2020 г.)

2 – карстовая воронка на трассе М-8 (2023 г.)

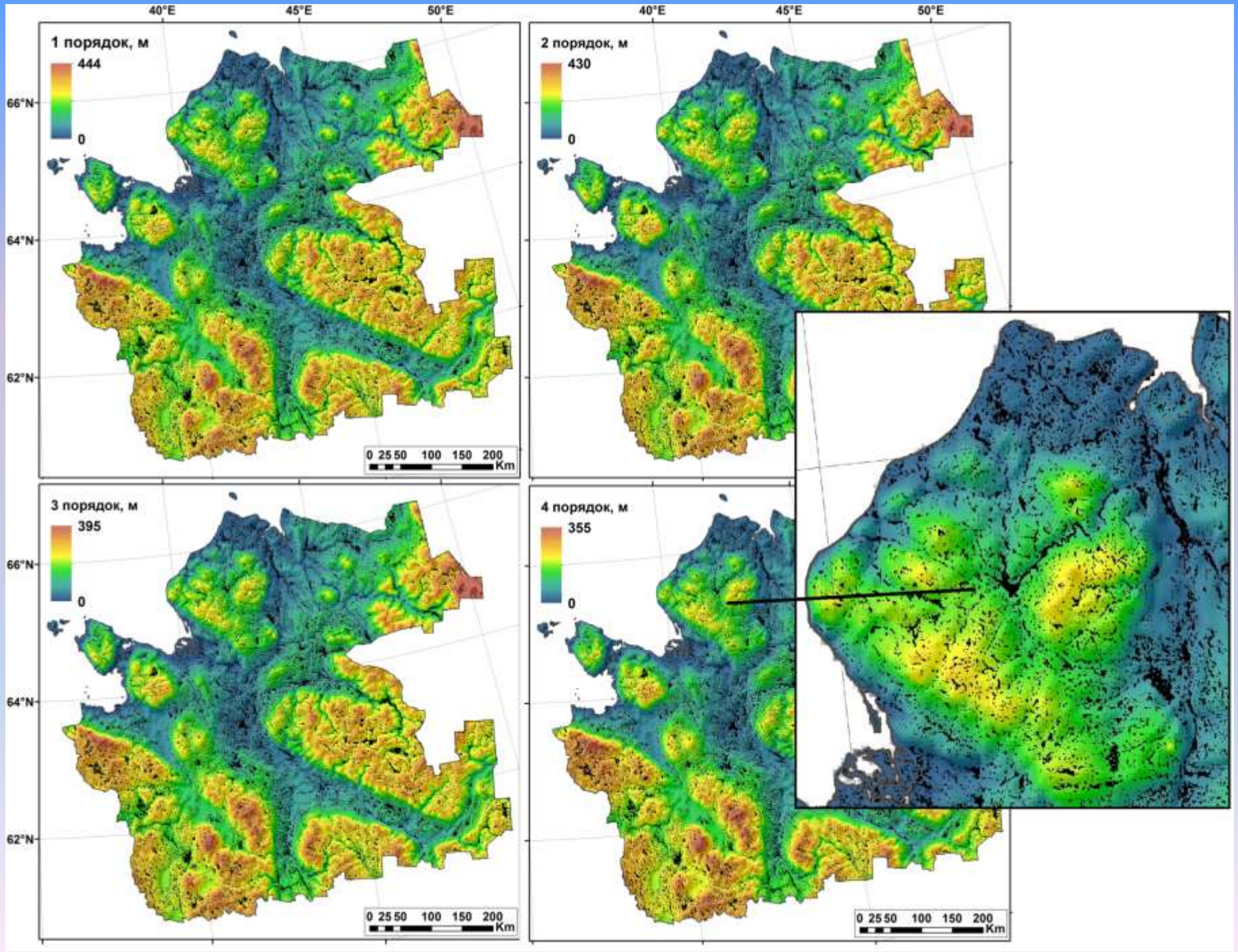
3 – карстовые воронки в дер. Кузомень (2020 г.)

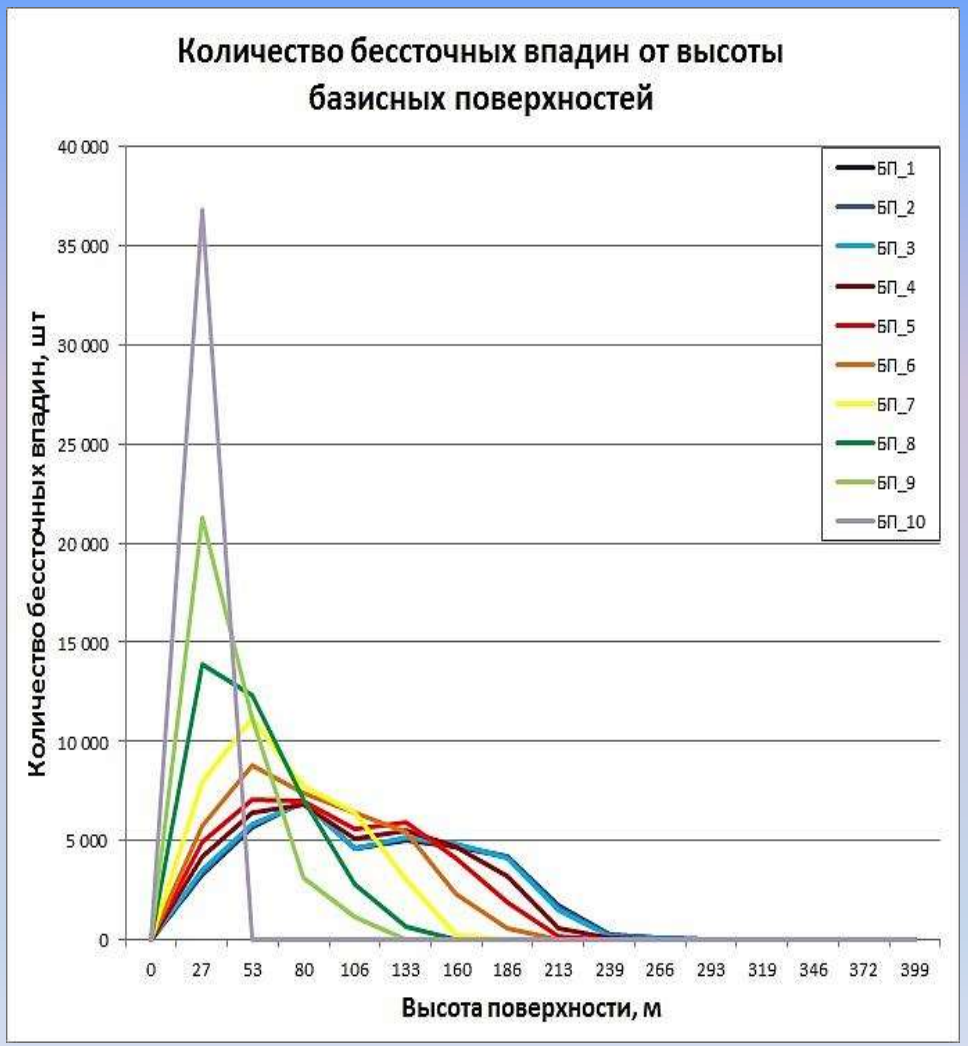


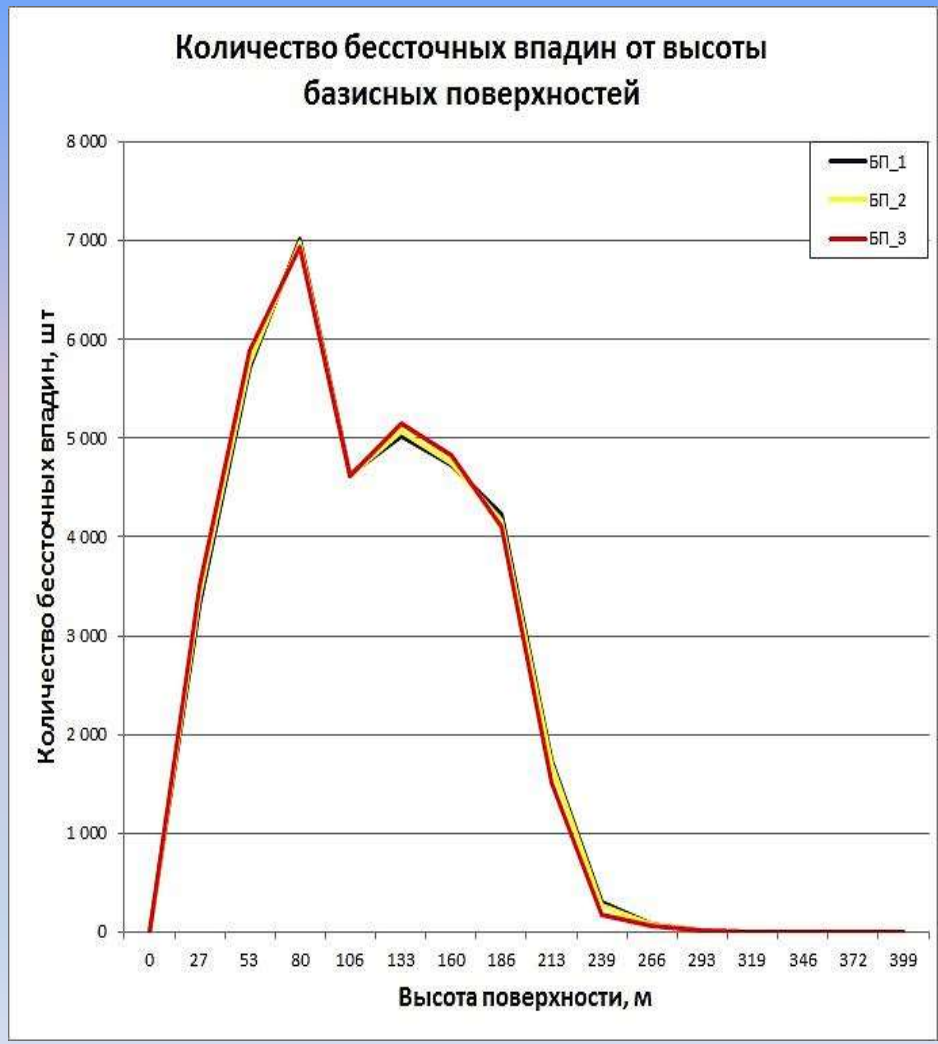
Распределение поверхностных карстовых форм по диаметрам, по (Дробинина, 2023)

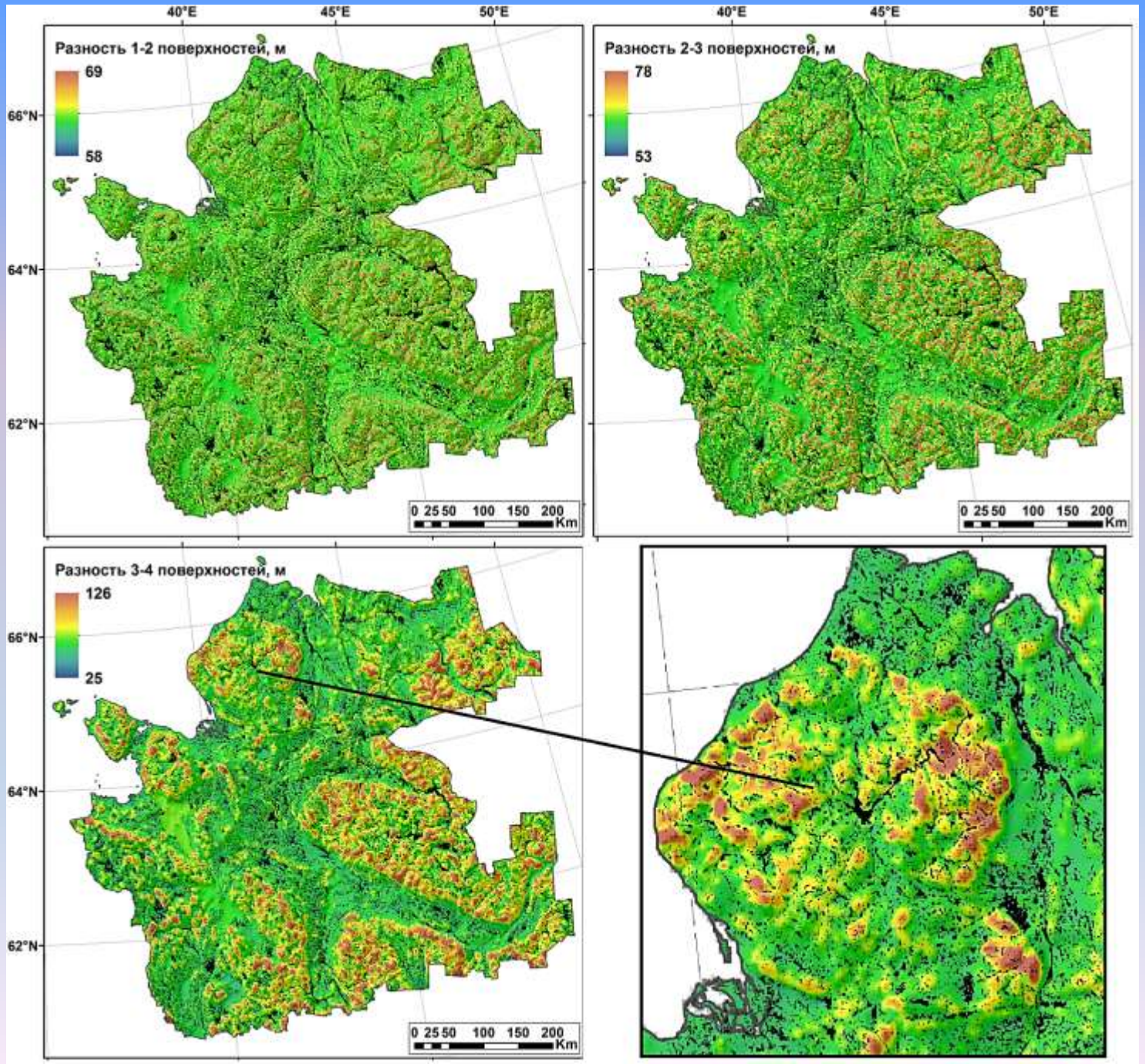


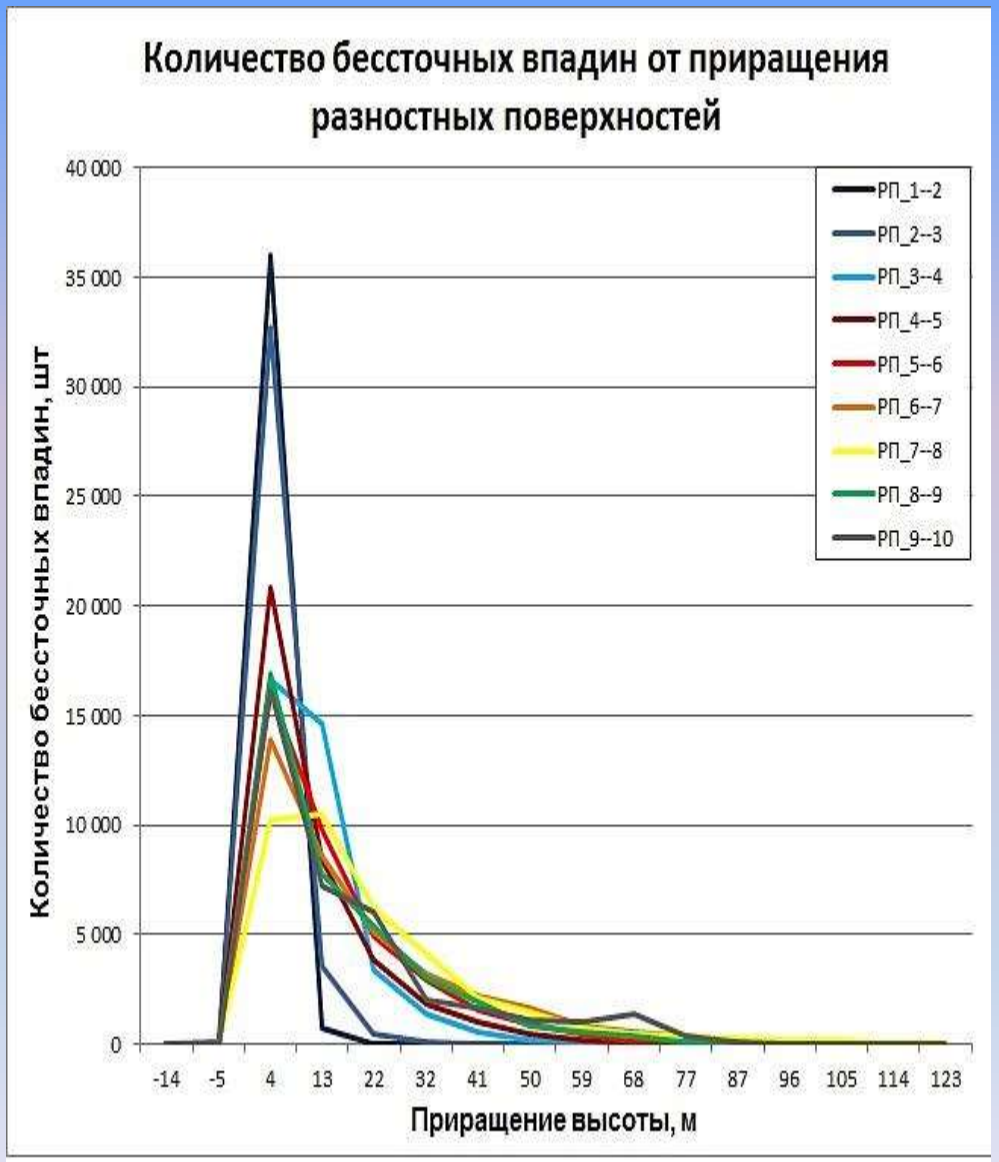
Распределение бессточных впадин по их максимальным площадям

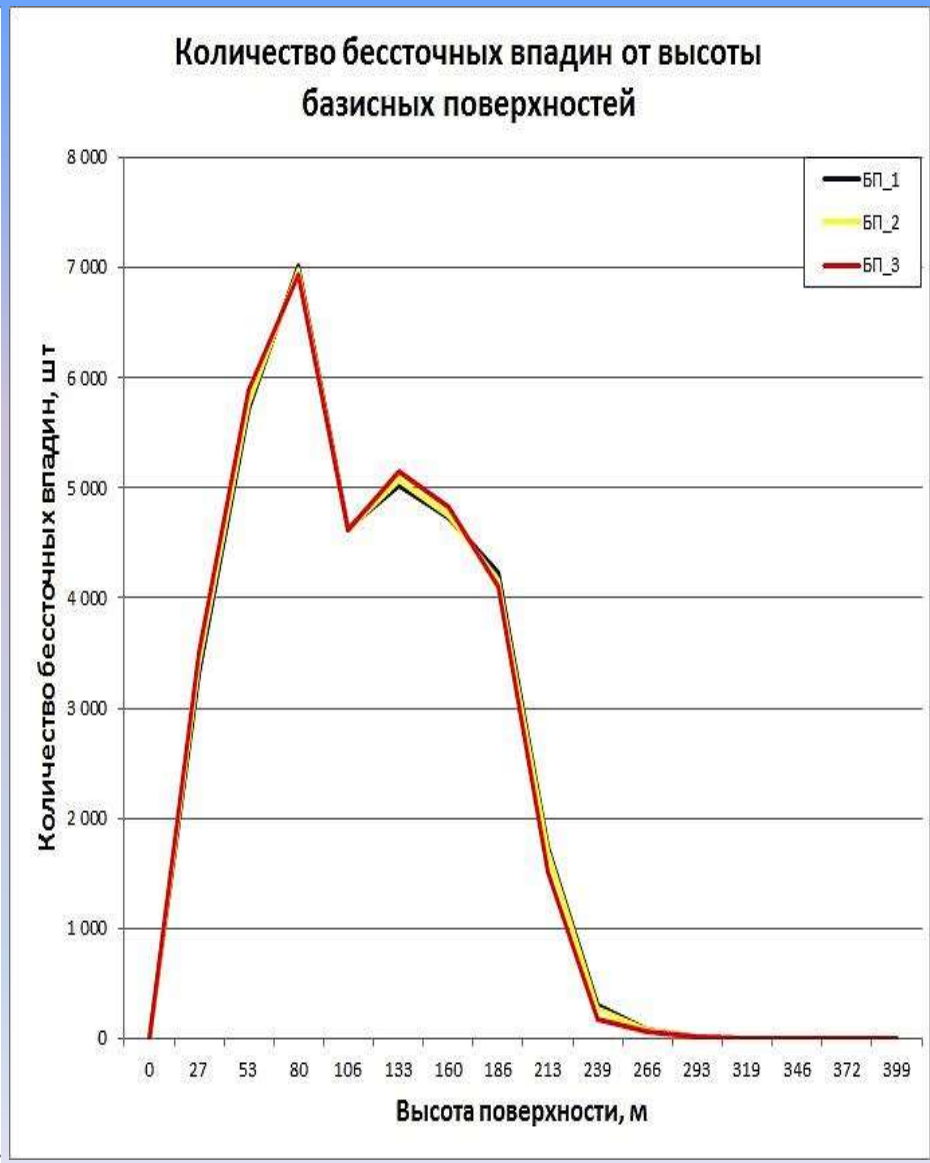

40°E
45°E
50°E
66°N
64°N
62°N
1 порядок, м
444
0
2 порядок, м
430
0
3 порядок, м
395
0
4 порядок, м
355
0
0 25 50 100 150 200
Km


Количество бессточных впадин от высоты базисных поверхностей
Количество бессточных впадин, шт
Высота поверхности, м
40 000
35 000
30 000
25 000
20 000
15 000
10 000
5 000
0
0 27 53 80 106 133 160 186 213 239 266 293 319 346 372 399
БП_1
БП_2
БП_3
БП_4
БП_5
БП_6
БП_7
БП_8
БП_9
БП_10


Количество бессточных впадин от высоты базисных поверхностей
Количество бессточных впадин, шт
Высота поверхности, м
8 000
7 000
6 000
5 000
4 000
3 000
2 000
1 000
0
0 27 53 80 106 133 160 186 213 239 266 293 319 346 372 399
БП_1
БП_2
БП_3

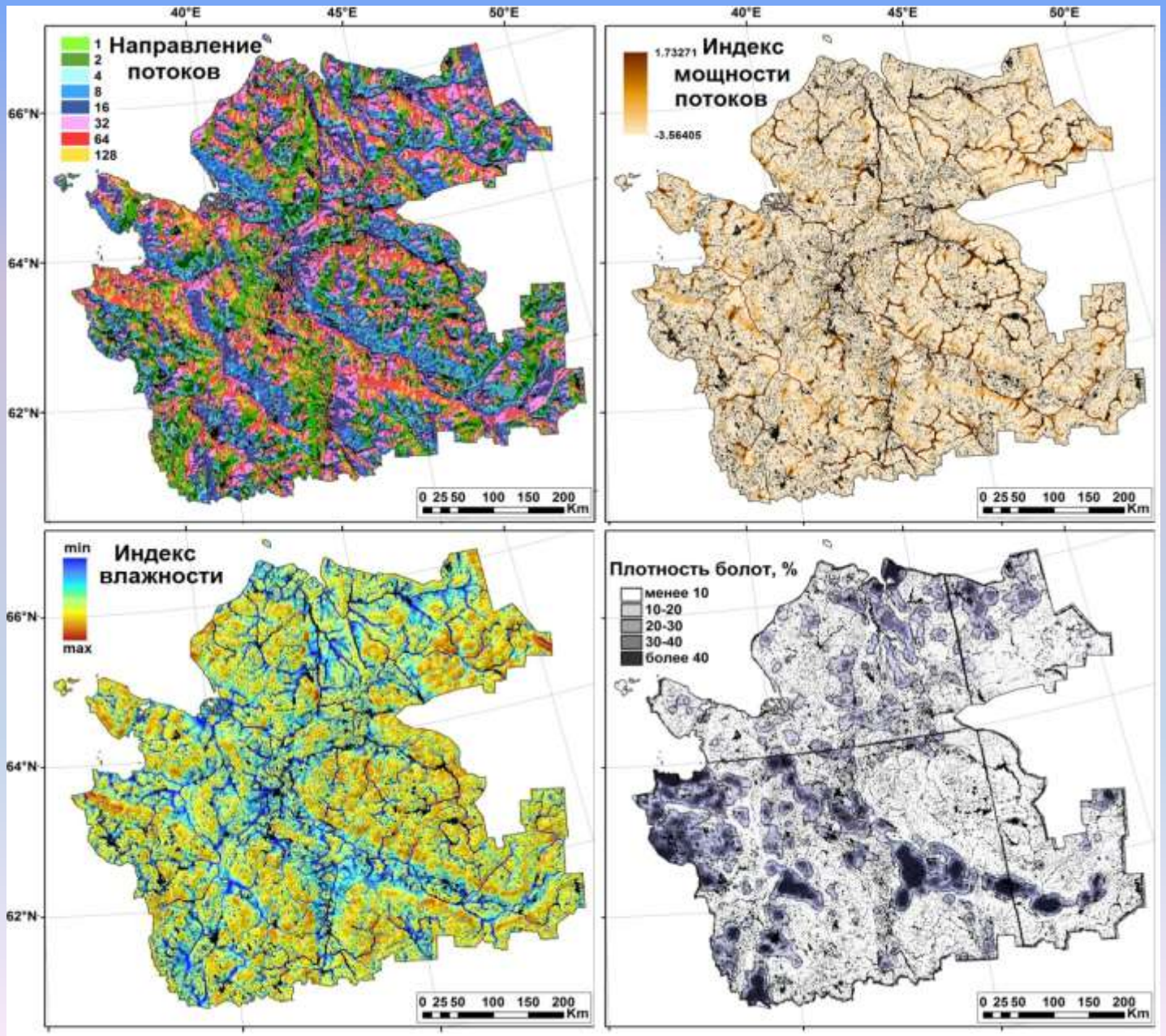

Разность 1-2 поверхностей, м
69
58
Разность 2-3 поверхностей, м
78
53
Разность 3-4 поверхностей, м
126
25
40°E
45°E
50°E
66°N
64°N
62°N
0 25 50 100 150 200
Km





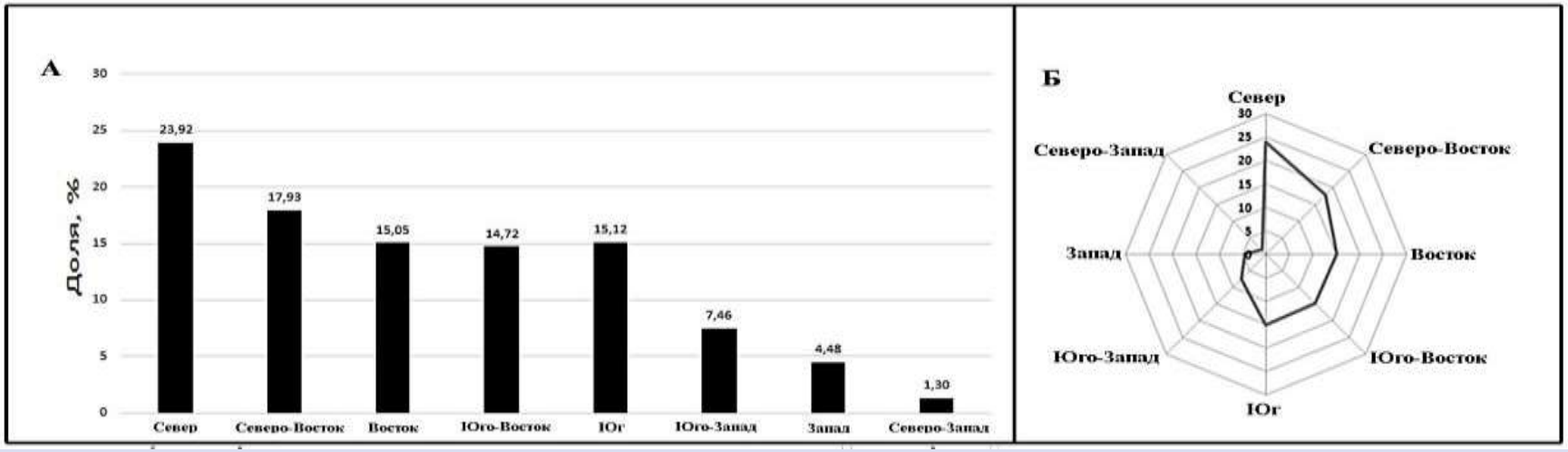
Наиболее глубокие впадины пространственно совпадают с поймами крупных рек и обусловлены, скорее всего, наличием стариц, а не артефактами модели (во всяком случае частично).

Сопоставление с гидрологическими параметрами и плотностью болот



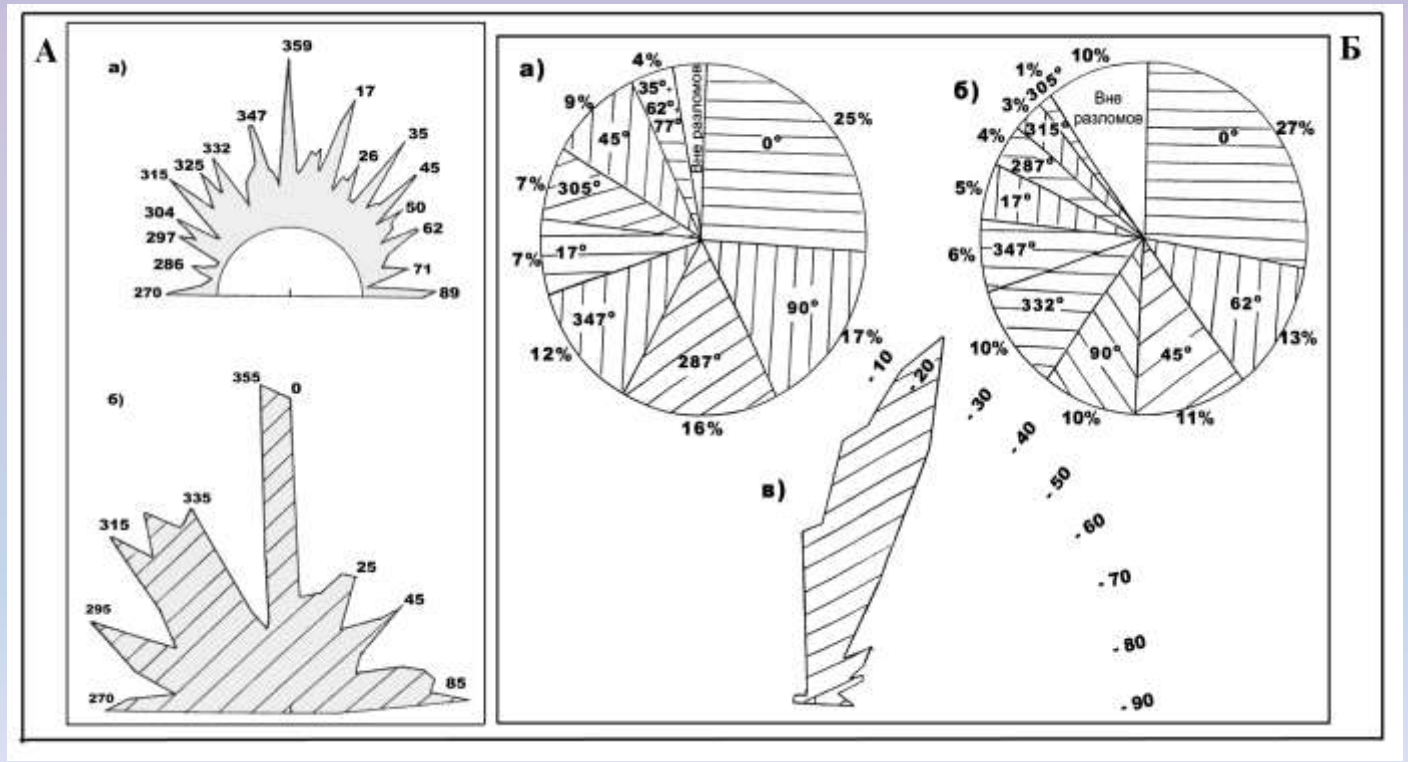
Статистическая характеристика направления потоков

Направление потока	Количество ячеек	Процент
Север	53934145	23,92
Северо-Восток	40430296	17,93
Восток	33935944	15,05
Юго-Восток	33196369	14,72
Юг	34088085	15,12
Юго-Запад	16825168	7,46
Запад	10111101	4,48
Северо-Запад	2925666	1,32
Общее количество ячеек ЦМР	344650349	100
Общее количество ячеек с потоками	225446774	65,41



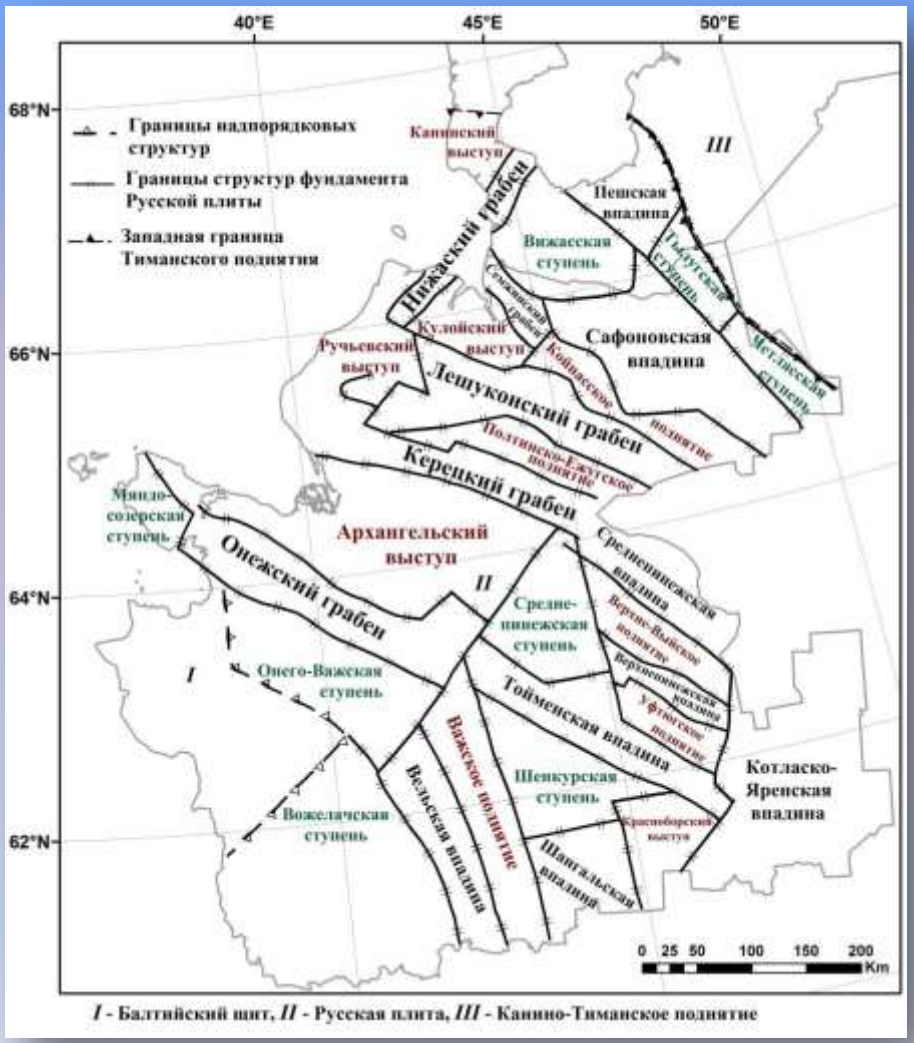
Направление потоков можно использовать для оценки простирания впадин и их соответствия тектоническим структурам.

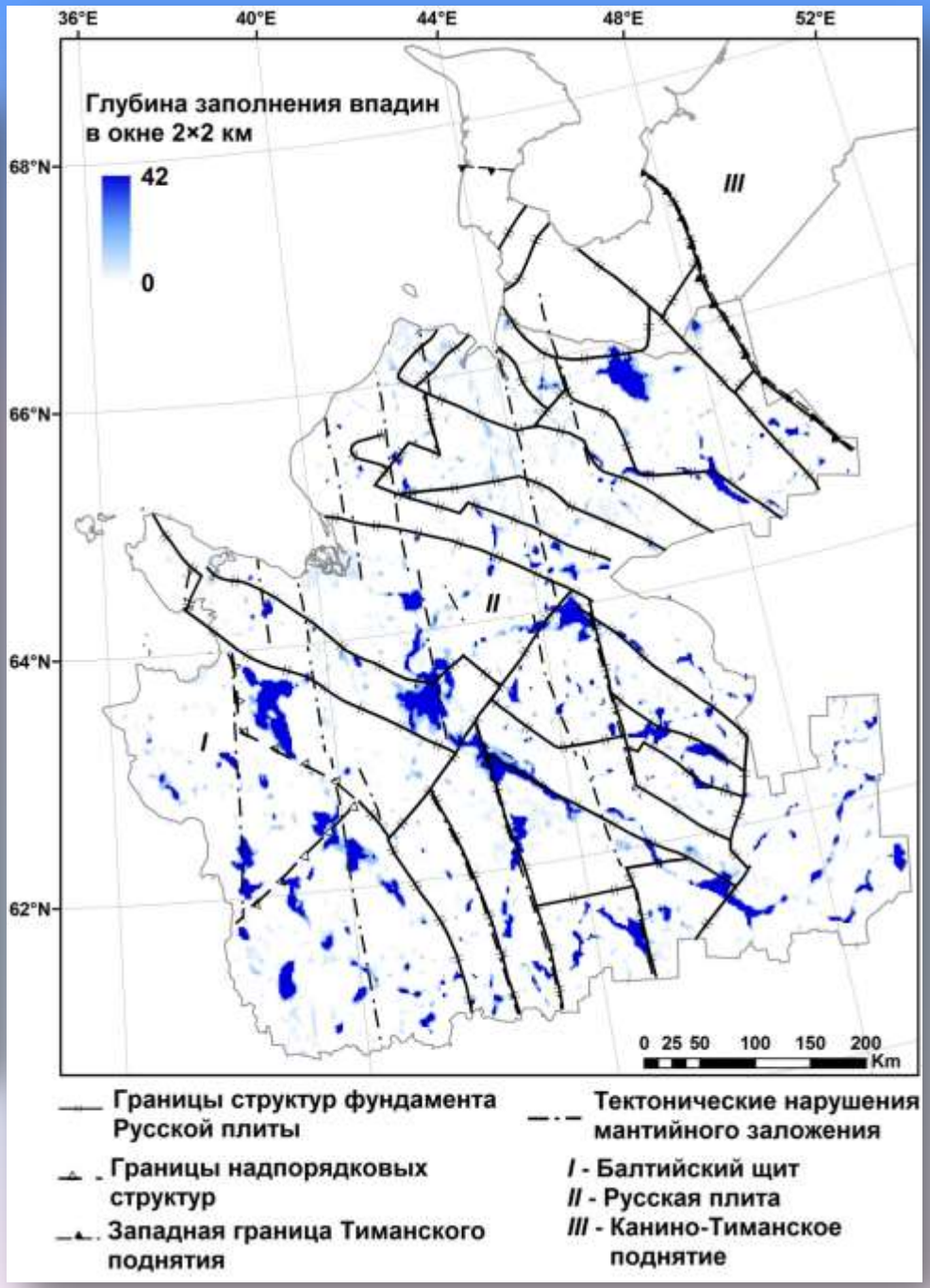
Полученный вывод по преобладающему простиранию достаточно интересен не только с геоэкологической точки зрения, но и с геологической. Так, проведенный в работах (Кутинов, Чистова, 2004; Кутинов и др., 2012; Кутинов и др., 2020) анализ показал такое доминирующее меридиональное простирание границ вендских отложений на территории Юго-Восточного Беломорья, в парных направлениях трубок взрыва и их статистических параметрах



А – розы-диаграммы:
а) спрямленных отрезков геологических границ вендских отложений; б) парных направлений трубок взрыва;
Б – частоты встречаемости трубок взрыва: а) в региональных; б) в локальных разломах; в) роза-диаграмма ориентировки длинных осей трубок взрыва

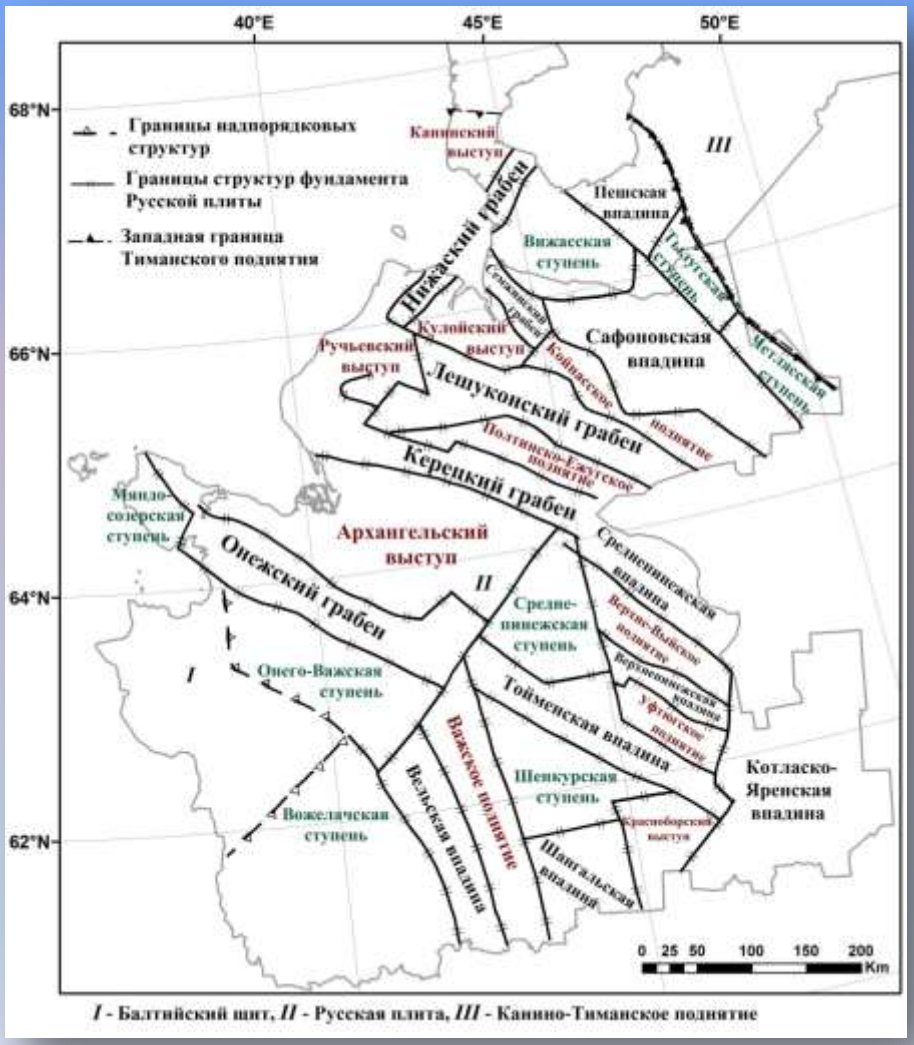
Совпадение доминирующих простираний бессточных впадин с параметрами пространственного распространения трубок взрыва и их приуроченности к разломам позволяет сделать вывод о роли тектонических структур, переживших герцинский этап активизации.



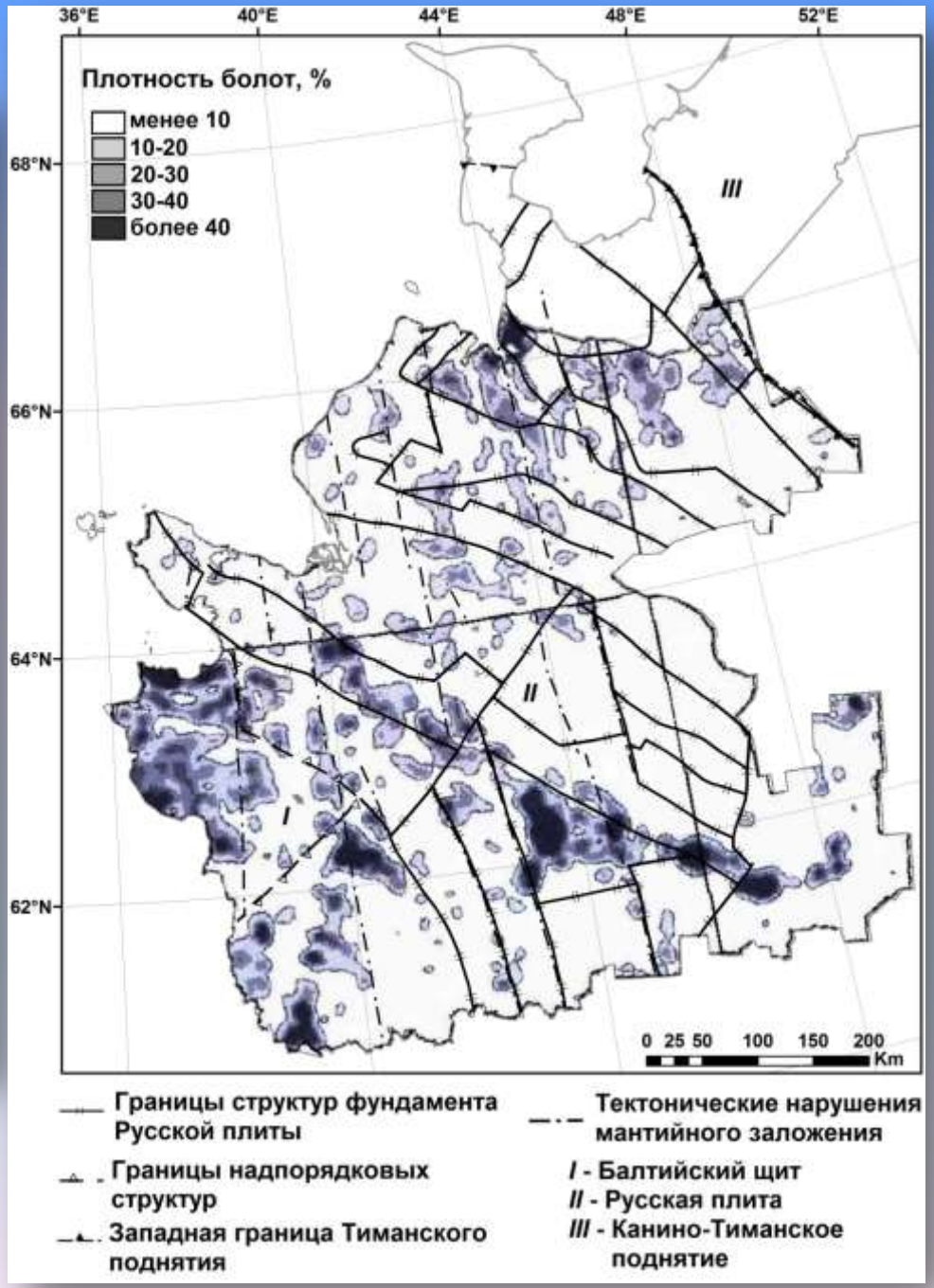


Основные структуры фундамента Русской плиты

(в границах Архангельской области)



I - Балтийский щит, *II* - Русская плита, *III* - Канино-Тиманское поднятие

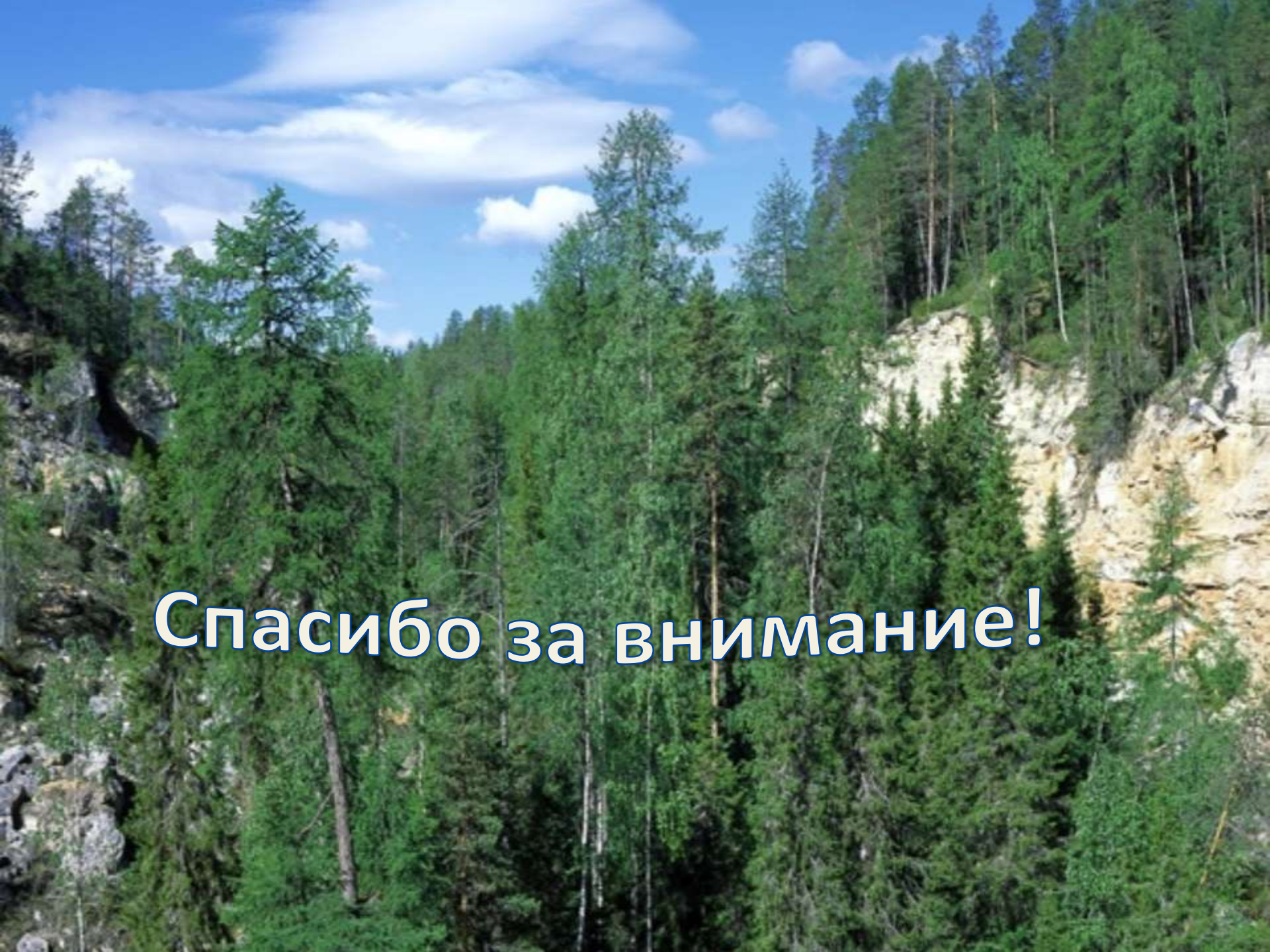


Основные структуры фундамента Русской плиты

(в границах Архангельской области)

Выводы:

1. Несомненно, в связи с труднодоступностью северных территорий из-за отсутствия дорог и развитой инфраструктуры, геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа является достаточно информативным инструментом при выделении участков вероятной активизации карстового процесса.
2. Наиболее глубокие впадины пространственно совпадают с поймами крупных рек и обусловлены, скорее всего, наличием стариц, а не артефактами модели (во всяком случае, частично).
3. Такой показатель, как направление потоков можно также использовать для оценки простирания впадин и их соответствия тектоническим структурам.


Спасибо за внимание!