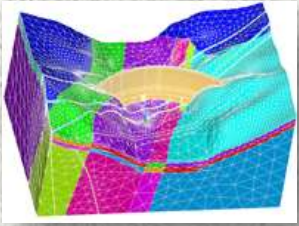


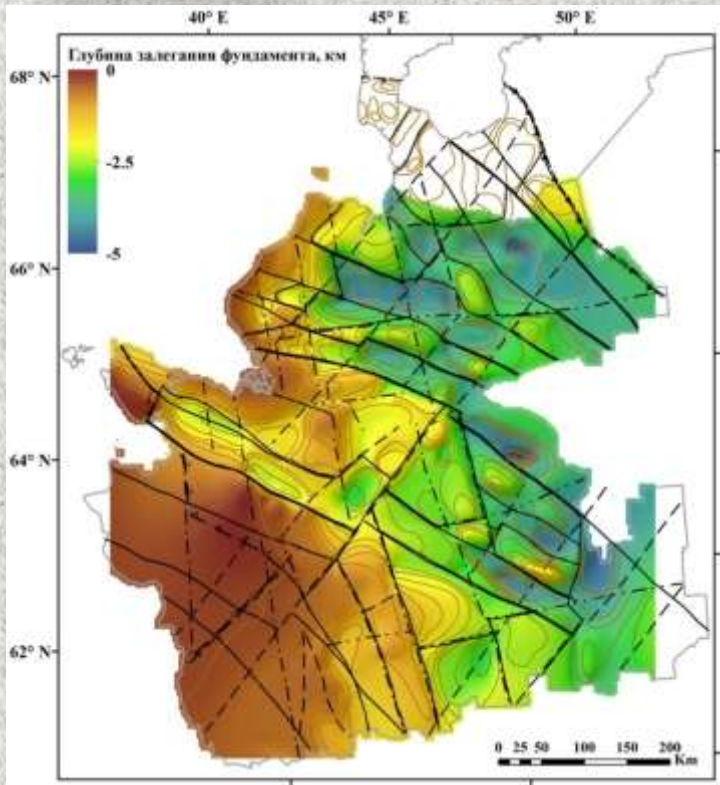
Отражение структур кристаллического фундамента Севера Русской плиты в современном рельефе



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

¹Институт геодинамики и геологии ФГБУН ФИЦКИА РАН, Архангельск

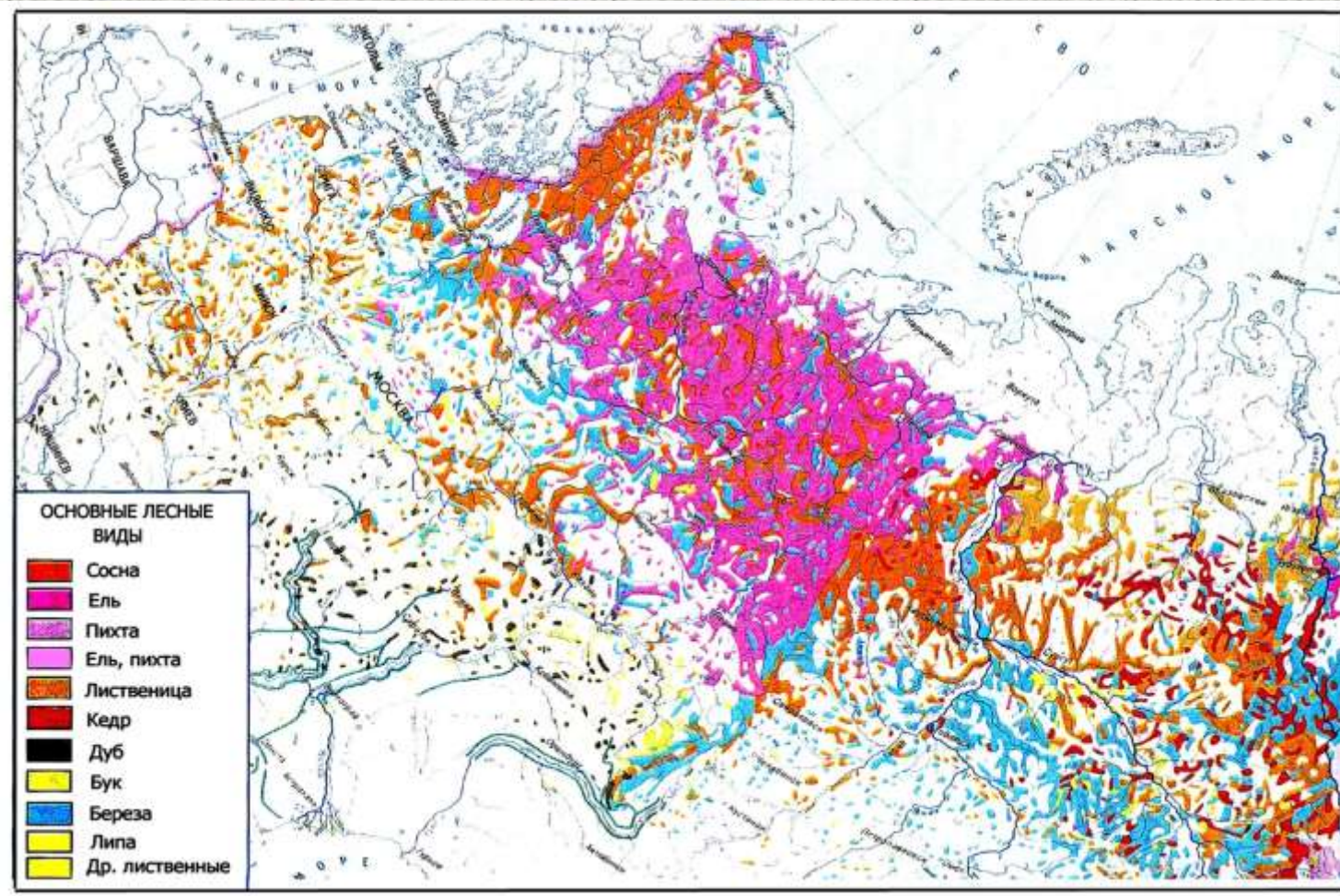
²Центр космического мониторинга Арктики САФУ имени М.В. Ломоносова



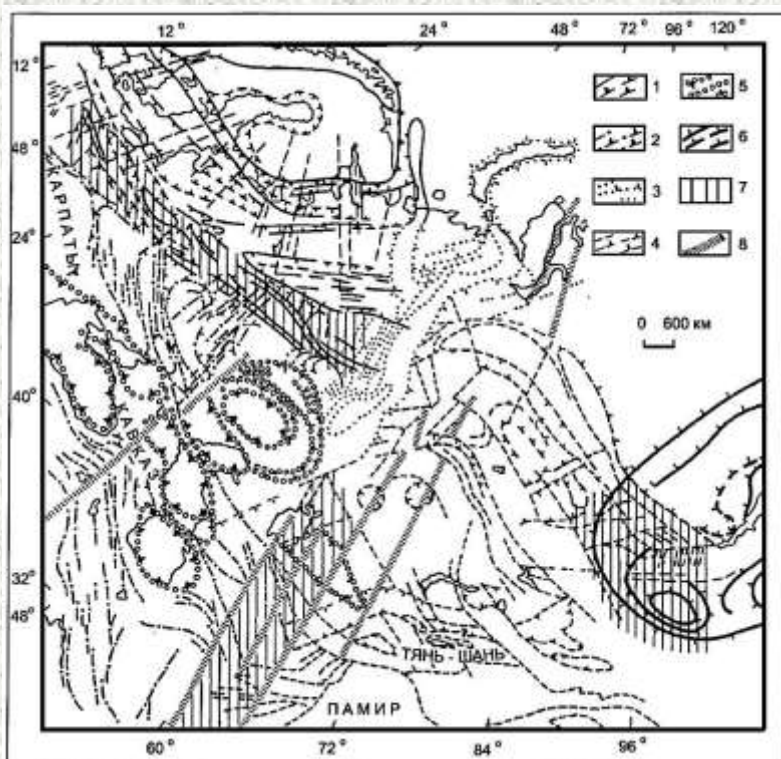
**14 Всероссийская открытая конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса (Физические основы, методы и
технологии мониторинга окружающей среды,
потенциально опасных явлений и объектов)»
г. Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2016 г.**

Район исследований характеризуется широким развитием растительного покрова (среднетаежная подзона северной тайги), слабой расчлененностью и «молодостью» рельефа, обусловленной широким распространением валдайского оледенения, большой мощностью перекрывающих четвертичных отложений (40-200 м) (Кутинов и др., 2011).

На настоящий момент достаточно распространено мнение, что после валдайского оледенения рельеф не достиг той стадии «зрелости», когда в нем проявляются тектонические нарушения фундамента и осадочного чехла.



Леса Архангельской области занимают (по данным учета лесного фонда на 01. 01. 2003 г.) площадь 29540,9 тыс. га, в том числе леса 1 группы 7995,4 тыс. га (27.1%), лесные земли 22886.1 тыс. га (77,5 %), покрытые лесом земли 22517.8 тыс. га (76.2 % от общей площади лесов). Площадь Архангельской области, покрытая лесом – 27097,9 тыс. га (65,6% всей территории).



Новейшие геодинамические системы центральной части Северной Евразии (Современные изменения..., 1996)

1-6 - Геодинамические системы:

1 - Скандинавская;

2 - Альпийская;

3 - Уральская;

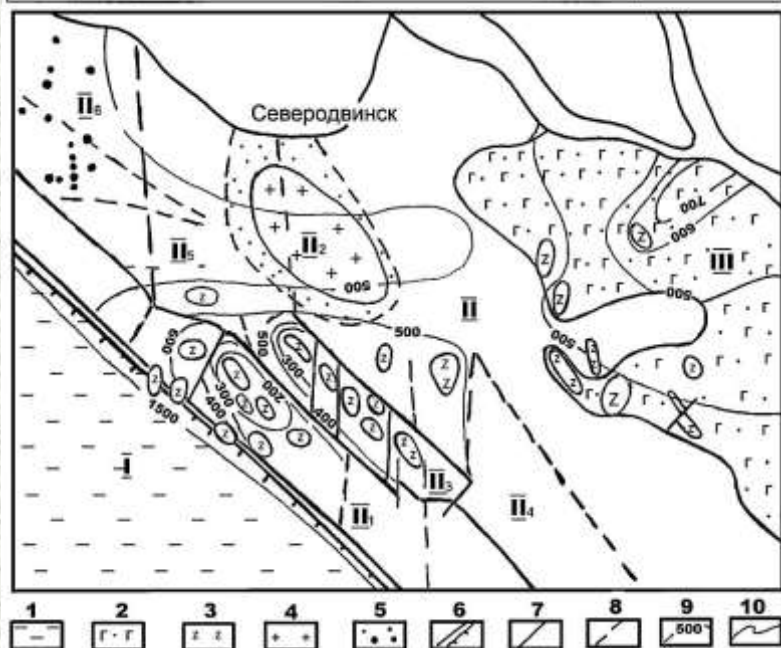
4 - Центрально-Азиатская;

5 - Черноморско-Каспийская;

6 - Байкальская;

7 - зоны сопряжения геодинамических систем;

8 - крупнейшие зоны флексурно-разрывных нарушений



Структурно-тектоническая ситуация части северо-восточного борта Онежского грабена (Кутинов, Чистова, 2004)

Основные структуры фундамента:

I - Онежский грабен;

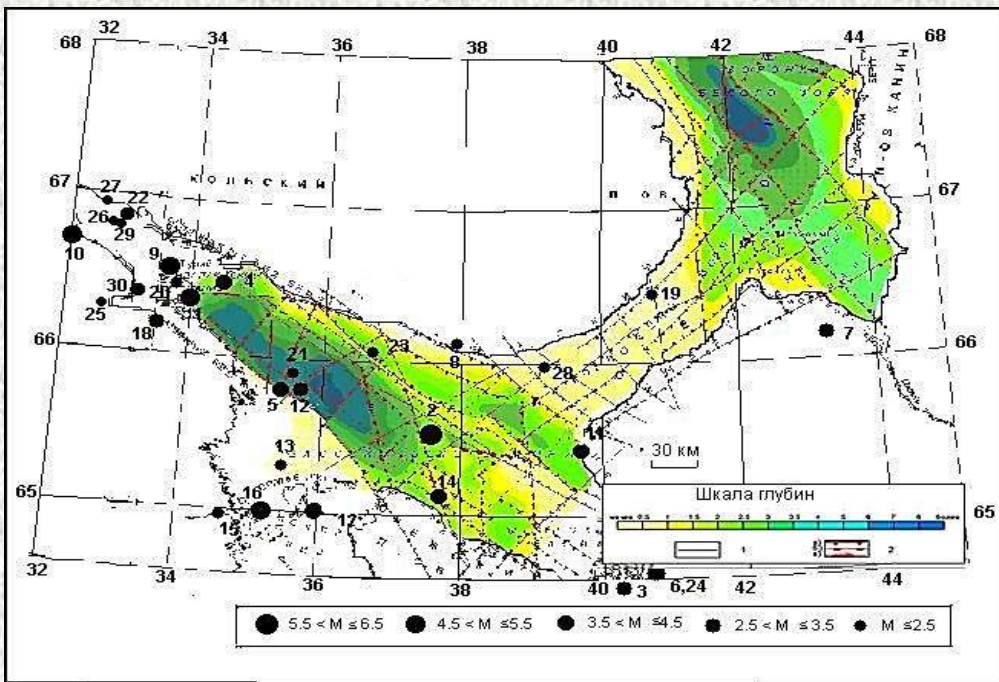
II - Солзенская ступень; II₁ - Синегорский блок; II₂

- Кудемская интрузия; II₃ - Пихкальский блок; II₄ -

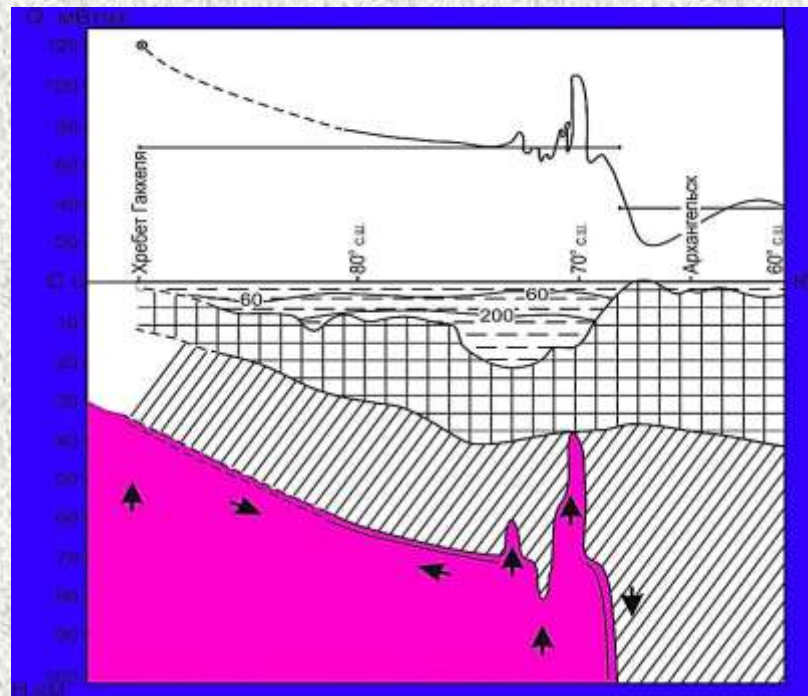
Белозерский блок; II₅ - Сальский блок; II₆ -

Ненокский блок;

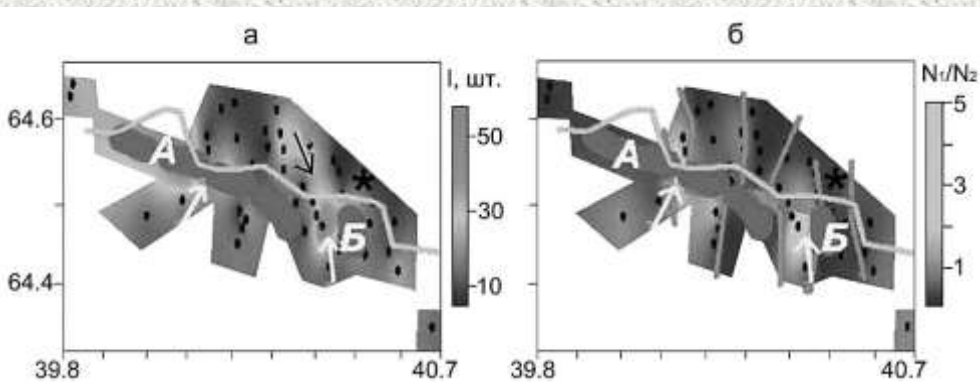
III - Архангельский мегавал



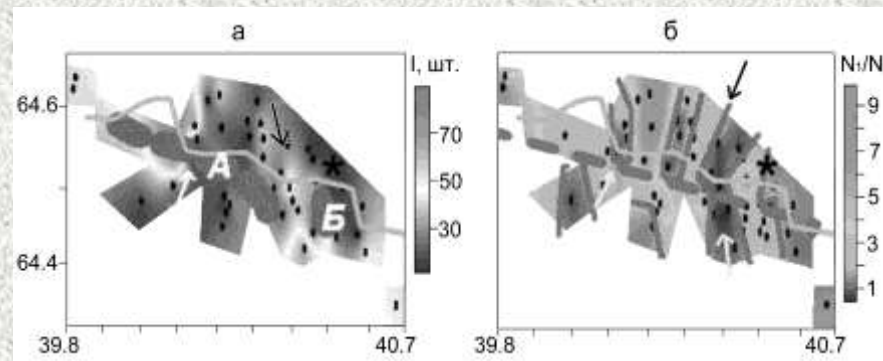
Структура фундамента Белого моря с эпицентрами ощутимых ($M \geq 3.5$) землетрясений Беломорско-Двинского района за период 1542-2007 гг. (Казанин и др., 2006)



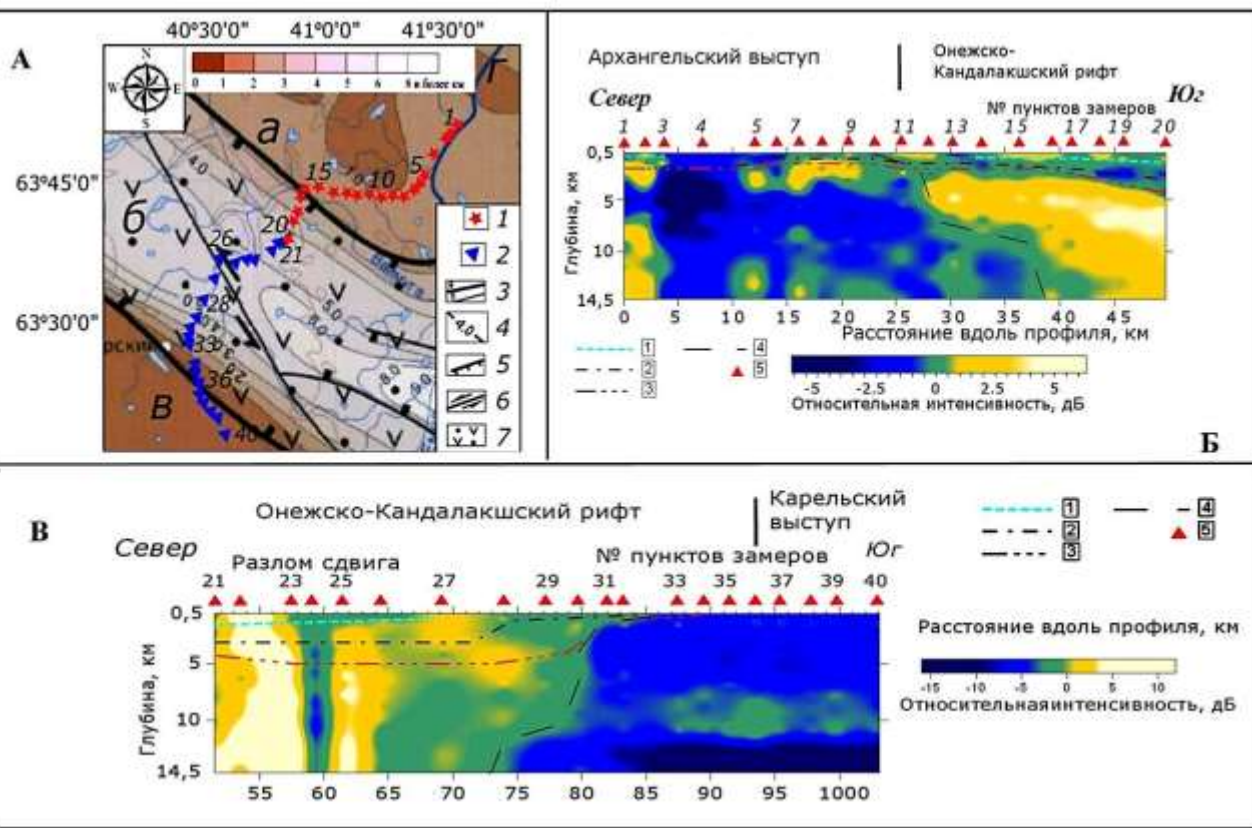
Разрез литосферы (хр. Гаккеля – Нансена – Архангельск) (Шварцман, 2002)



Карты сейсмического эндогенного излучения для частоты 2,2 Гц: а – интенсивность, б – анизотропия



Карты сейсмического эндогенного излучения для частоты 17,4 Гц: а – интенсивность, б – анизотропия



Отражение бортов Онежского грабена в интенсивности микросейсм говорит о современных подвижках вдоль этих структур

Отражение бортов Онежского грабена в сейсмологических материалах (по данным Данилова К. Б.)

А – положение профилей исследования на тектонической карте (Тектоническая карта..., 2010)

а – Архангельский выступ; **б** – Онежско-Кандалакшский рифт; **в** – Карельский выступ; **г** – глубина залегания кристаллического фундамента.

1 – Пункты замеров микросейсм профиля Палово - Самодед; **2** – Пункты замеров микросейсм профиля Самодед - Малиновка; **3** – разломы (**а** – ограничивающие крупные структуры земной коры, **б** - прочие); **4** – изогипсы поверхности кристаллического фундамента; **5** – сбросы; **6** – сдвиги; **7** – вулканогенно-осадочный комплекс рифтовой впадины.

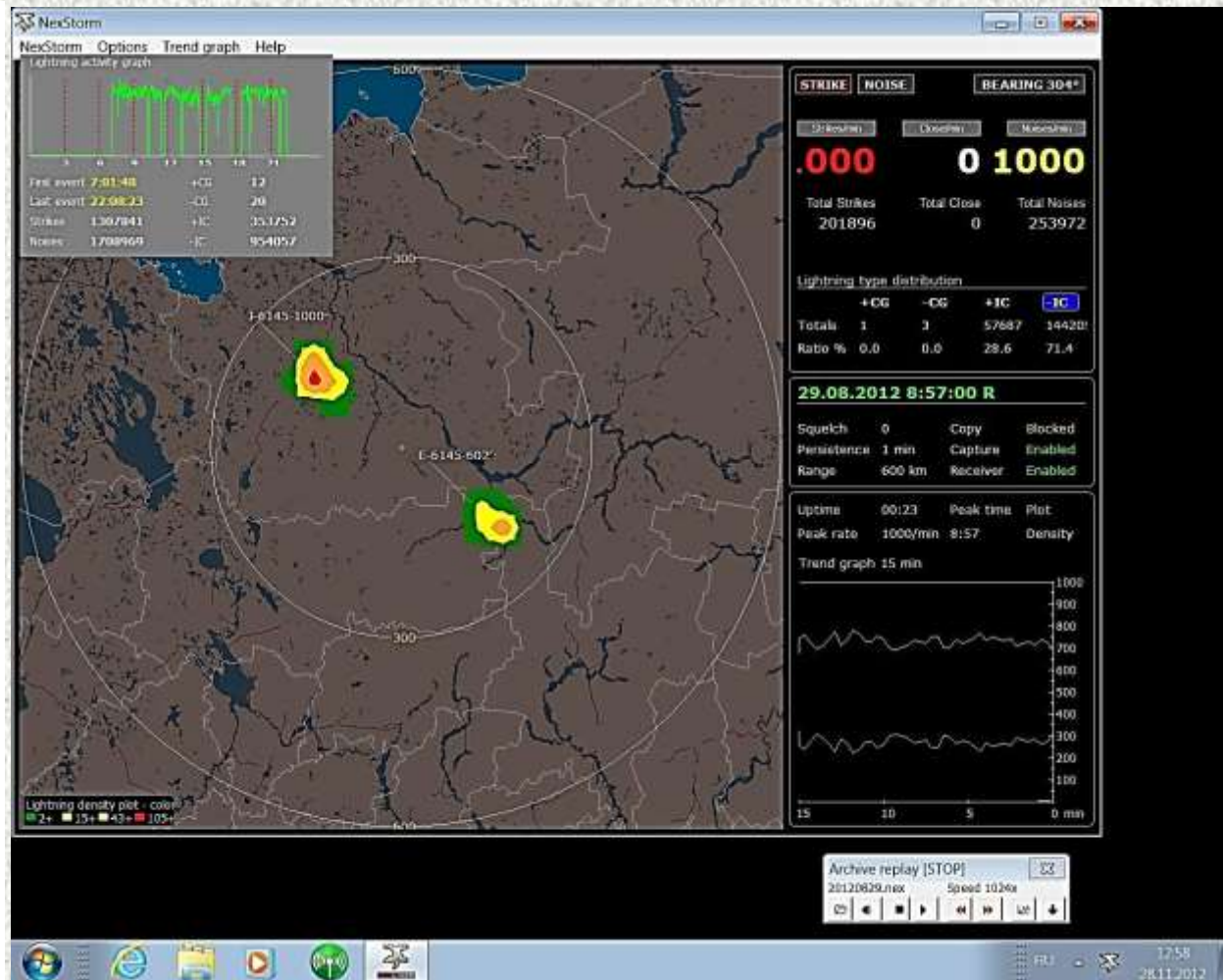
Б - Глубинный разрез распределений относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля Палово – Самодед

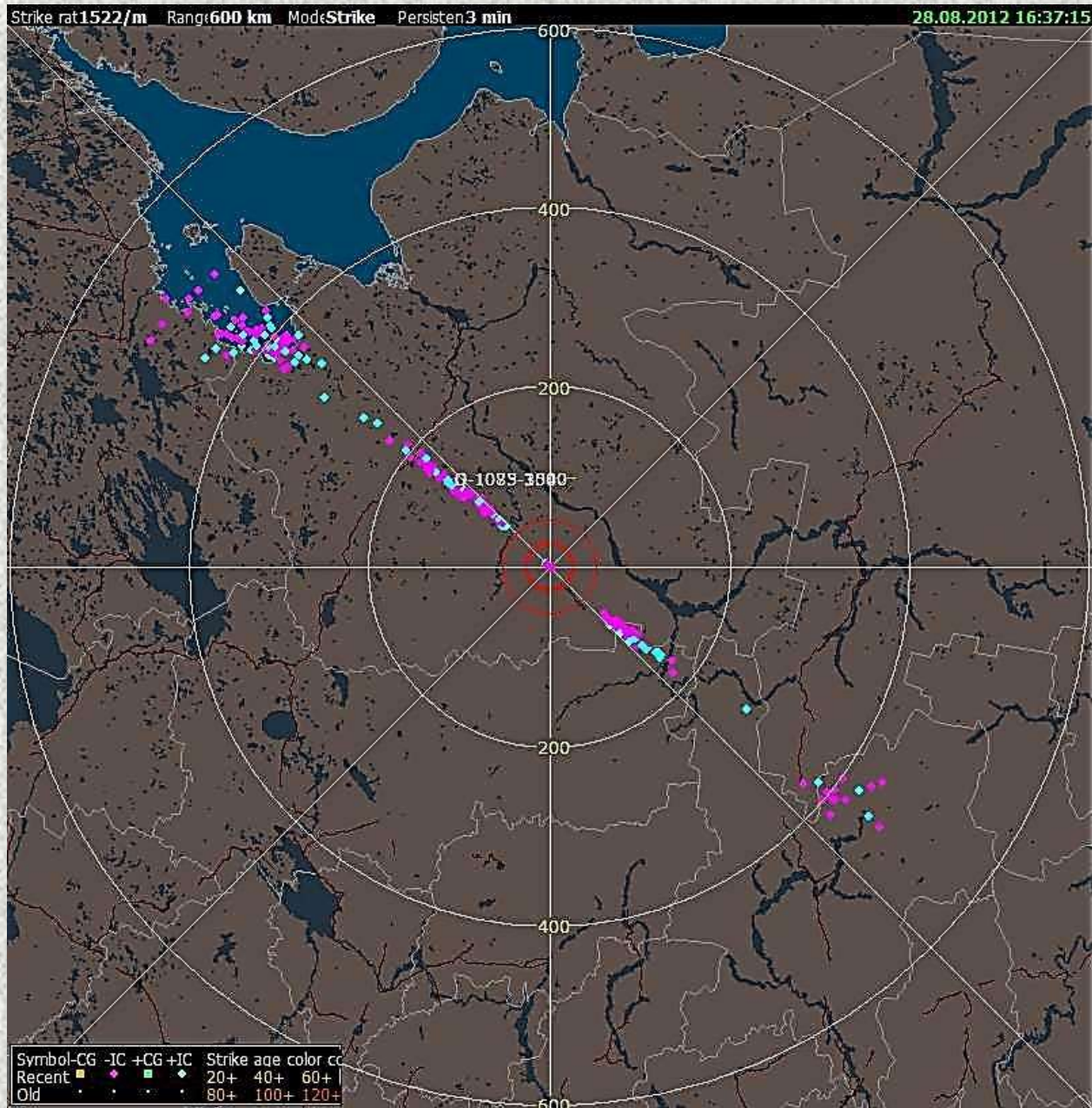
1 – граница поверхности рифейских отложений (Результаты..., 2004); **2** – граница кристаллического фундамента (Результаты..., 2004); **3** - граница кристаллического фундамента (Тектоническая карта..., 2010); **4** – глубинная граница Архангельского выступа и Онежско-Кандалакшского; **5** – пункты замеров

В - Глубинный разрез распределений относительной интенсивности микросейсм вдоль профиля Самодед-Малиновка

1 – граница поверхности рифейских отложений (Результаты ..., 2004); **2** – граница кристаллического фундамента (Результаты ..., 2004); **3** - граница кристаллического фундамента (Тектоническая карта ..., 2010); **4** – глубинная граница Архангельского выступа и Онежско-Кандалакшского; **5** – пункты замеров

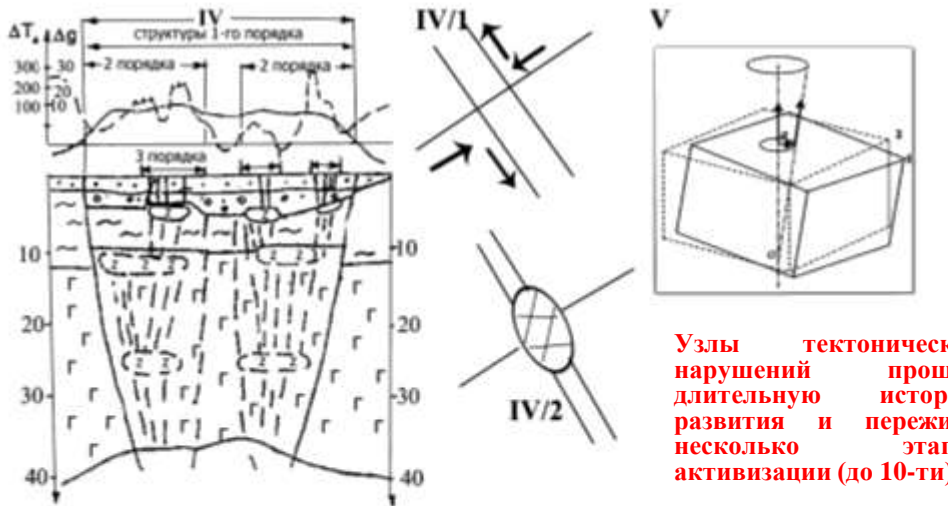
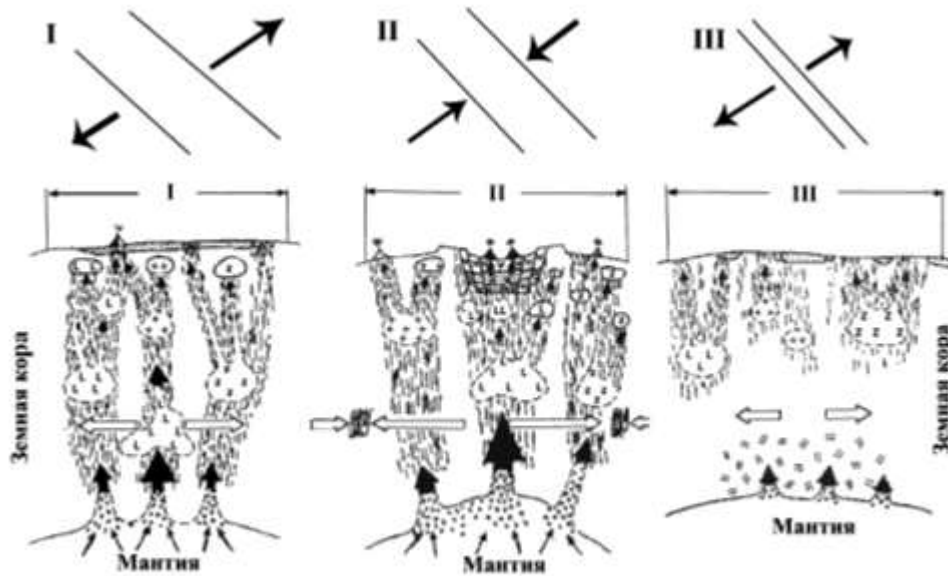
Было проведено тестовое опробование грозопеленгатора NexStorm (Voltek, USA). Прибор был установлен в д. Беляевская Устьянского района Архангельской области (центр Вельско-Устьянского тектонического узла). Радиус регистрации сигнала – 600 км. Прибор состоит из антенны, соединительного кабеля, датчика молний размещенного на плате PCI II





**Карта
пространственного
размещения грозовых и
электрических разрядов
на территории
Архангельской области
(23.08. 2012)**

Модель эволюции тектонических нарушений

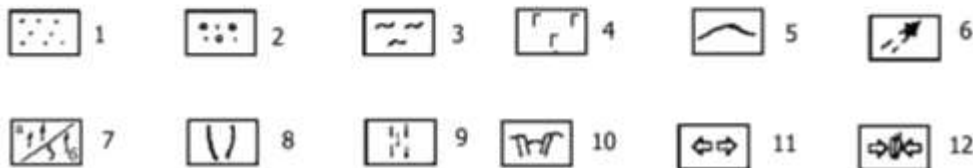


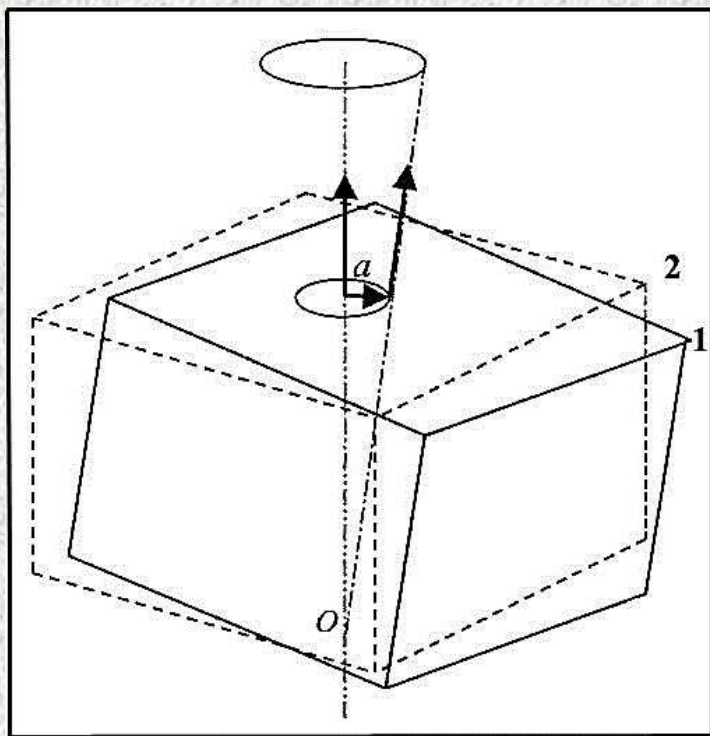
I-III - стадии развития (Магматизм и металлогения..., 1993): I - зарождения и созревания; II - активного рифтогенеза; III - затухания;

IV - палеозойская тектоно-магматическая активизация рифейского палеорифта (Чистова, 1996): IV/1 – вендская активизация, IV/2 – образование вертикальной высокопроницаемой структуры (герцинский этап);

V – современный этап: схема прецессии структурного блока земной коры (Спивак и др., 2009)

- 1 - осадочные отложения;
- 2 - рифейские осадочно-вулканические отложения;
- 3 - гранитно-метаморфический слой;
- 4 - базальтовый слой;
- 5 - поверхность Мохо;
- 6 - высоко проницаемая вертикальная мантийная колонна;
- 7 - теплопотоки (а), флюидные потоки (в);
- 8 - конические разломы;
- 9 - зоны проницаемости (трещиноватости, разломы);
- 10 - осевые грабены;
- 11 - направление и интенсивность растяжения; 12 - зоны сжатия

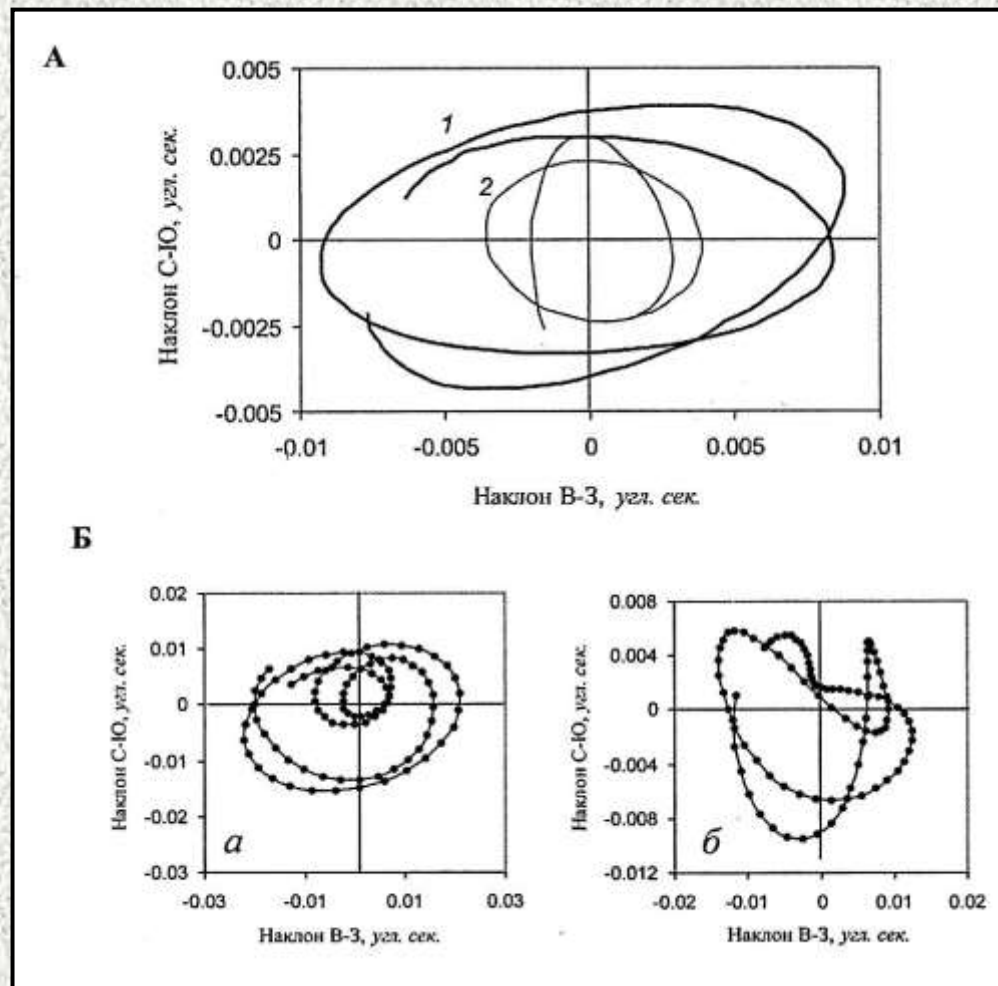




1 – Схема прецессии структурного блока земной коры (Спивак и др., 2009)

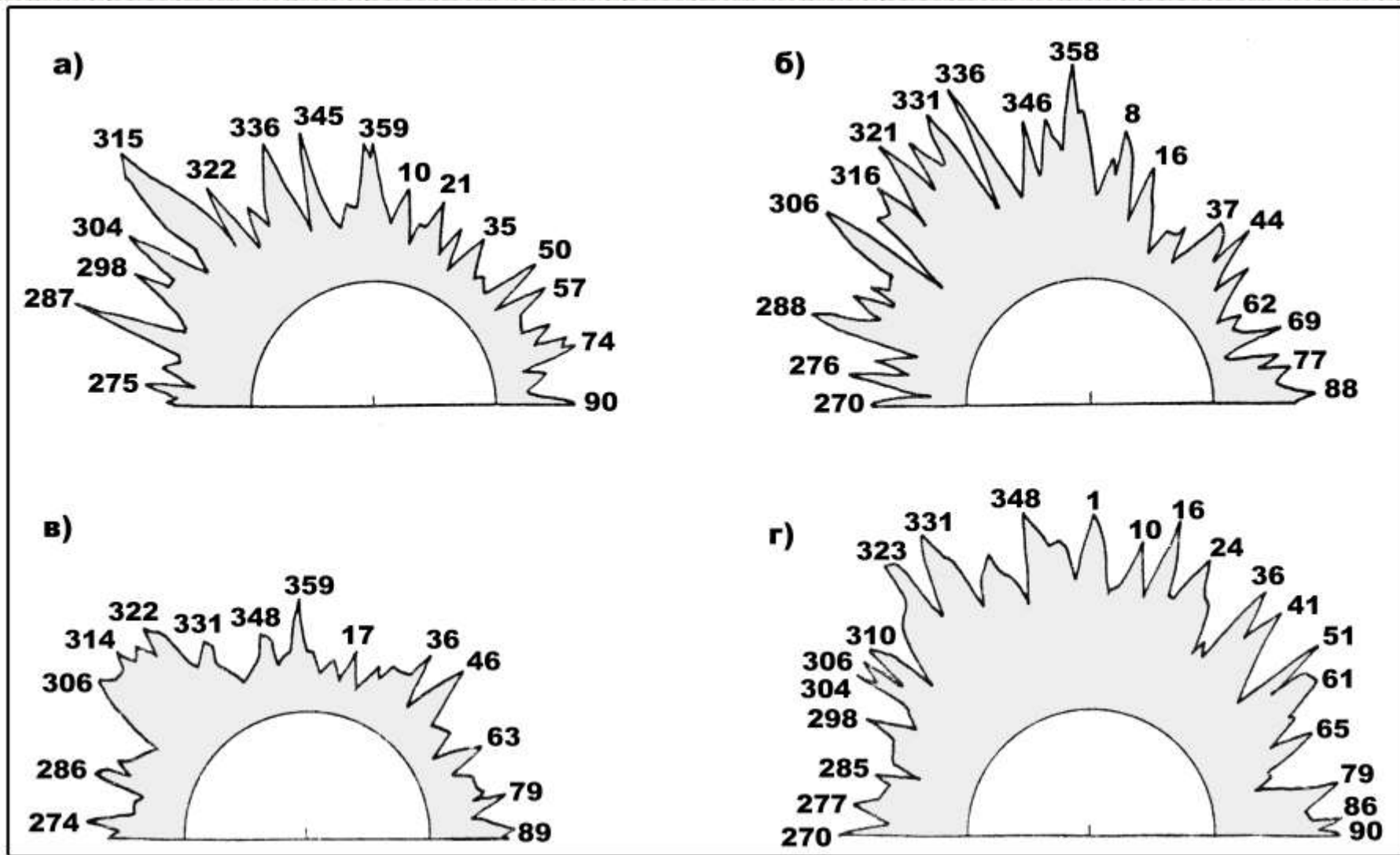
2 – Положение блока в отсутствии прецессии

O – центр прецессии



А – Пример суточных (1) и полусуточных (2) вариаций угла прецессии

Б – пример суточных вариаций угла прецессии с полусуточной нутацией (Спивак и др., 2009)



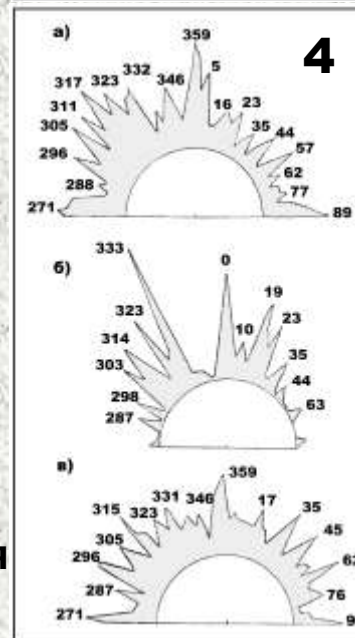
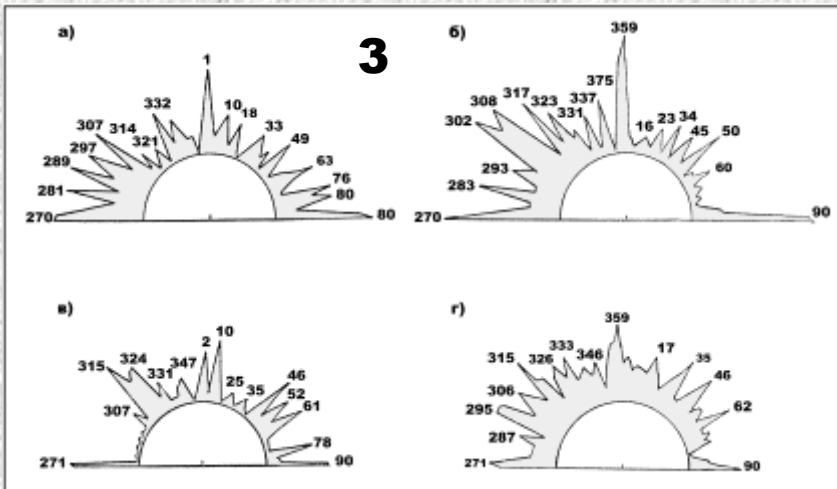
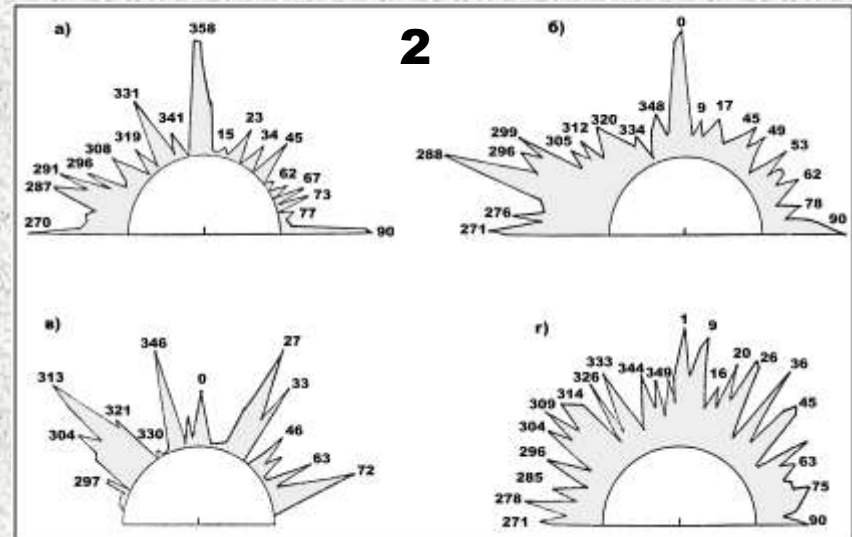
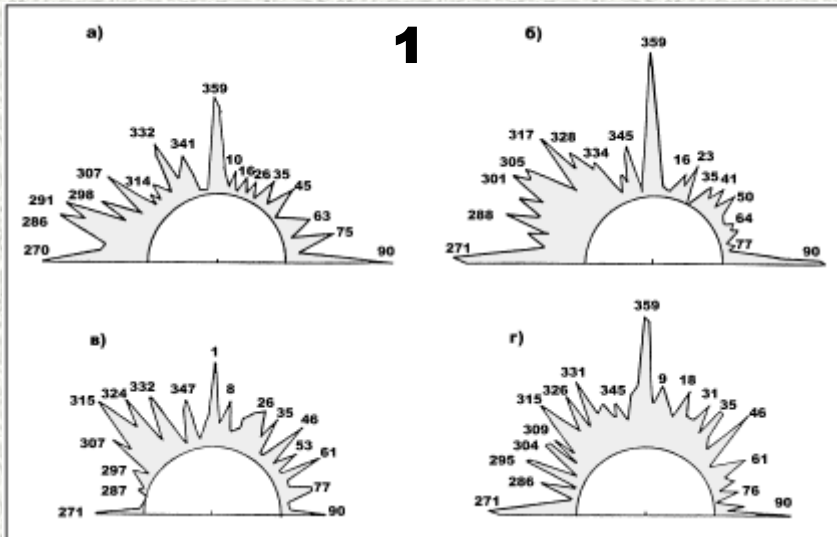
Розы-диаграммы элементов-индикаторов разломов:

а) поля силы тяжести; б) магнитного поля;

в) космофотолинеаментов; г) гидросети

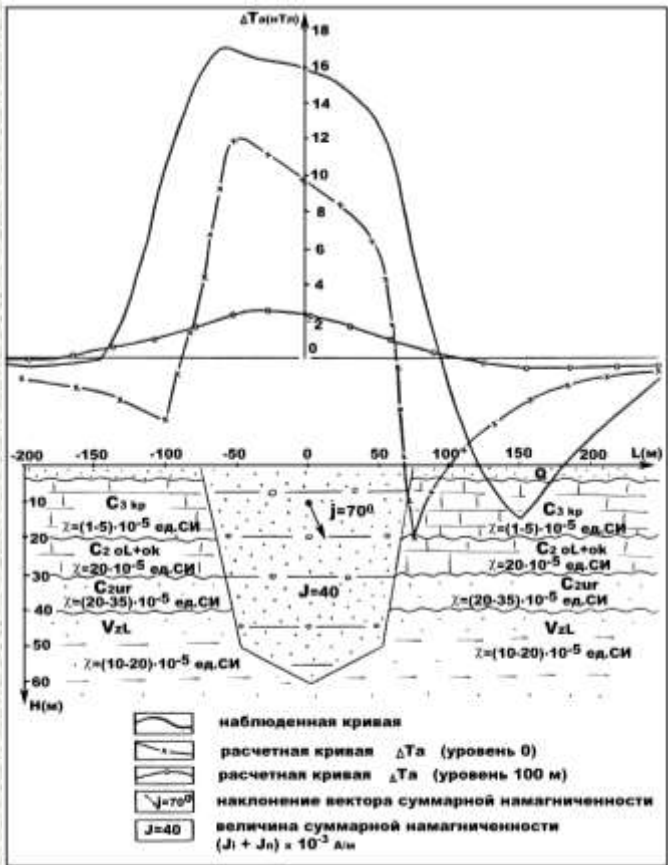
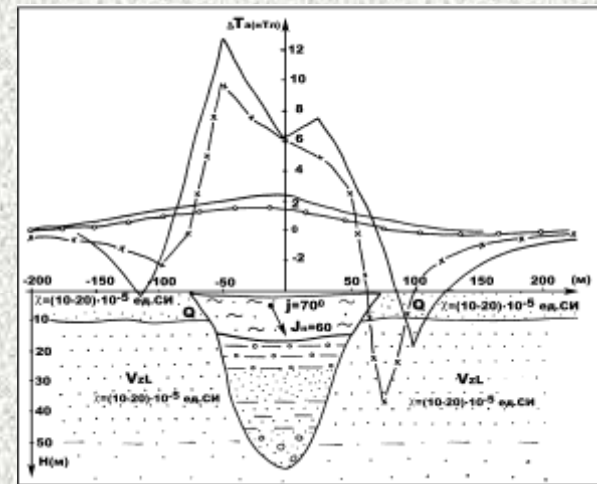
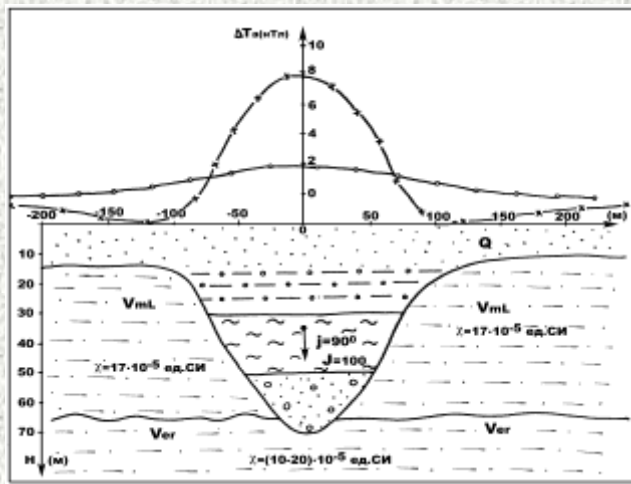
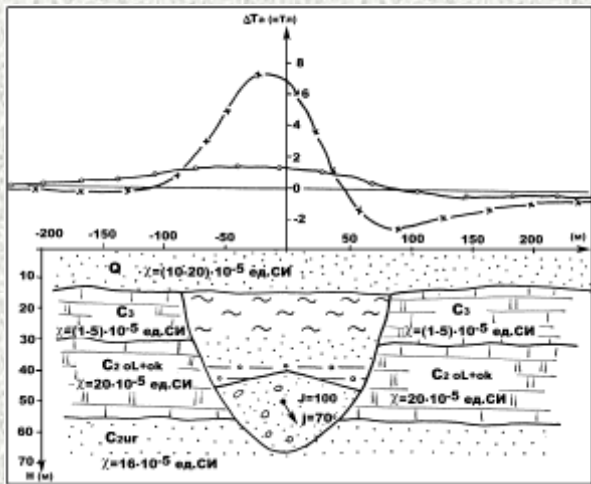
Розы-диаграммы элементов-индикаторов разломов:

1 – Юго-Восточного Беломорья; 2 – Зимнебережного района; 3 – Мезенского района;
4 – Онежского полуострова



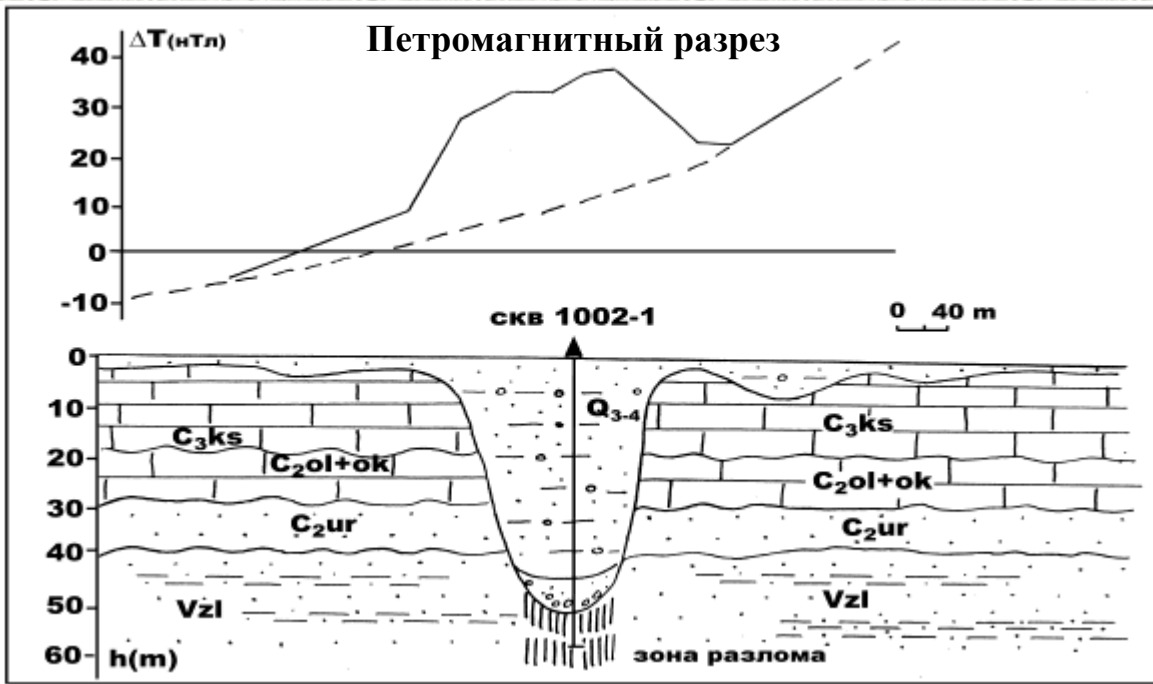
В результате анализа комплекса геофизических данных и данных ДЗЗ в регионе реально выделить практически все тектонические нарушения фундамента и дать им достаточно четкую классификацию.

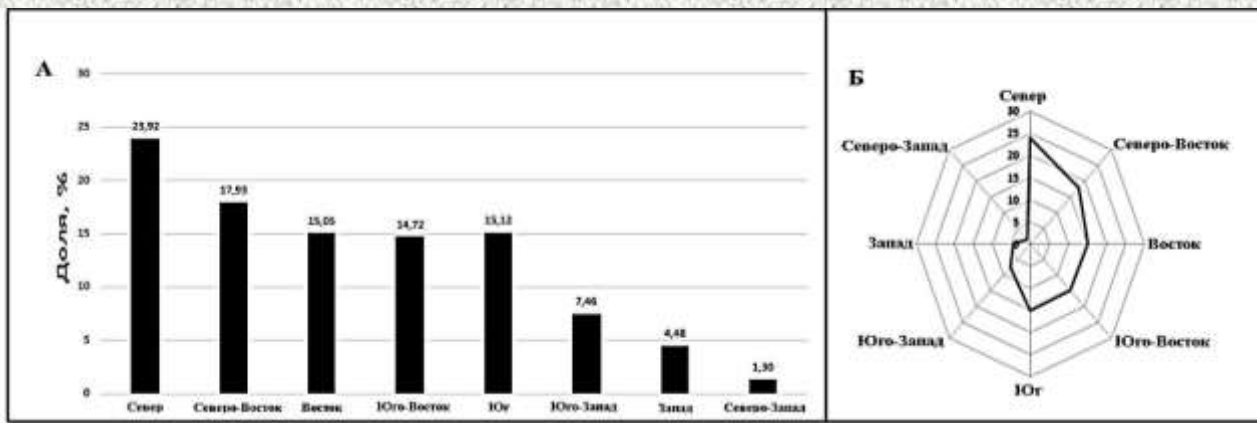
а) поля силы тяжести; б) магнитного поля
в) космофотолинеаментов; г) гидросети



Петромагнитные модели палеодолин

Свидетельство современных геохимических процессов





Статистическое распределение потоков
 А – гистограмма;
 Б – роза-диаграмма

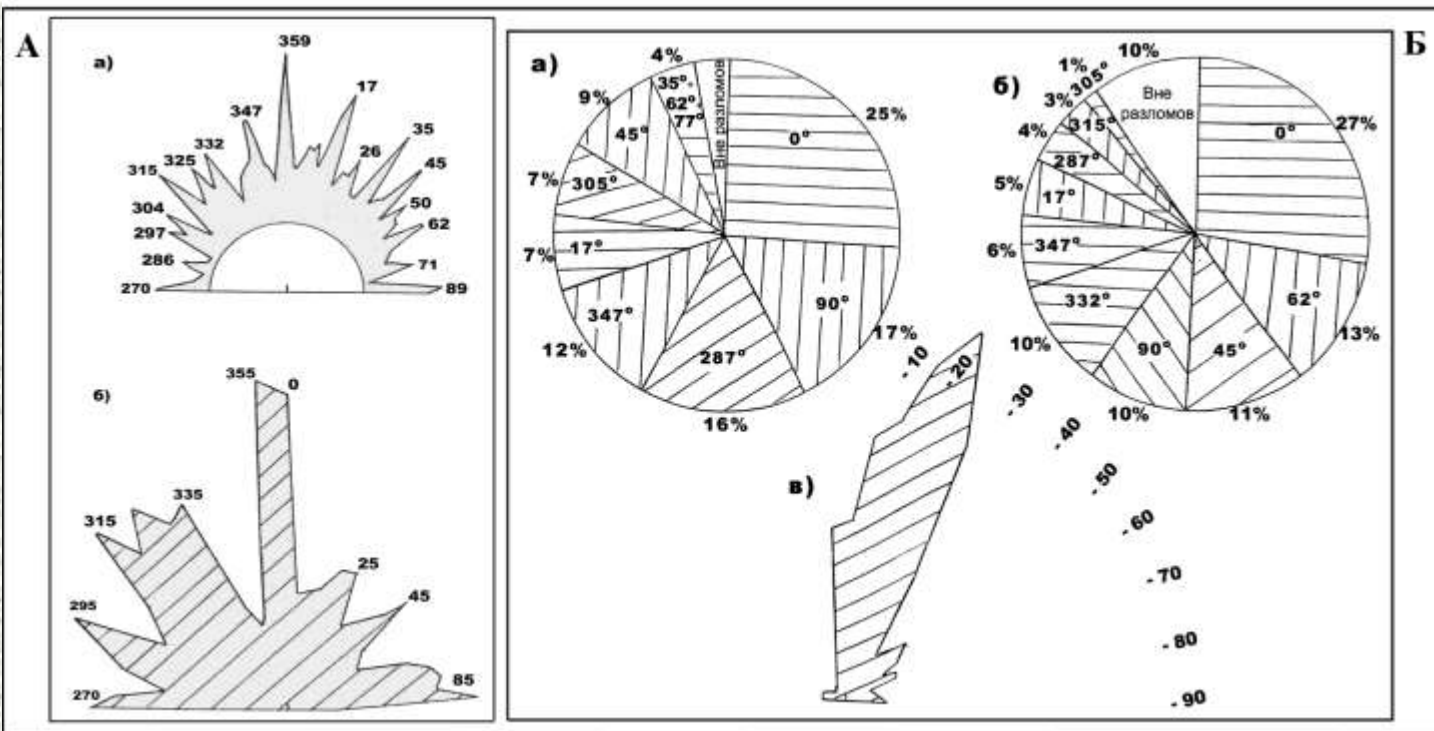
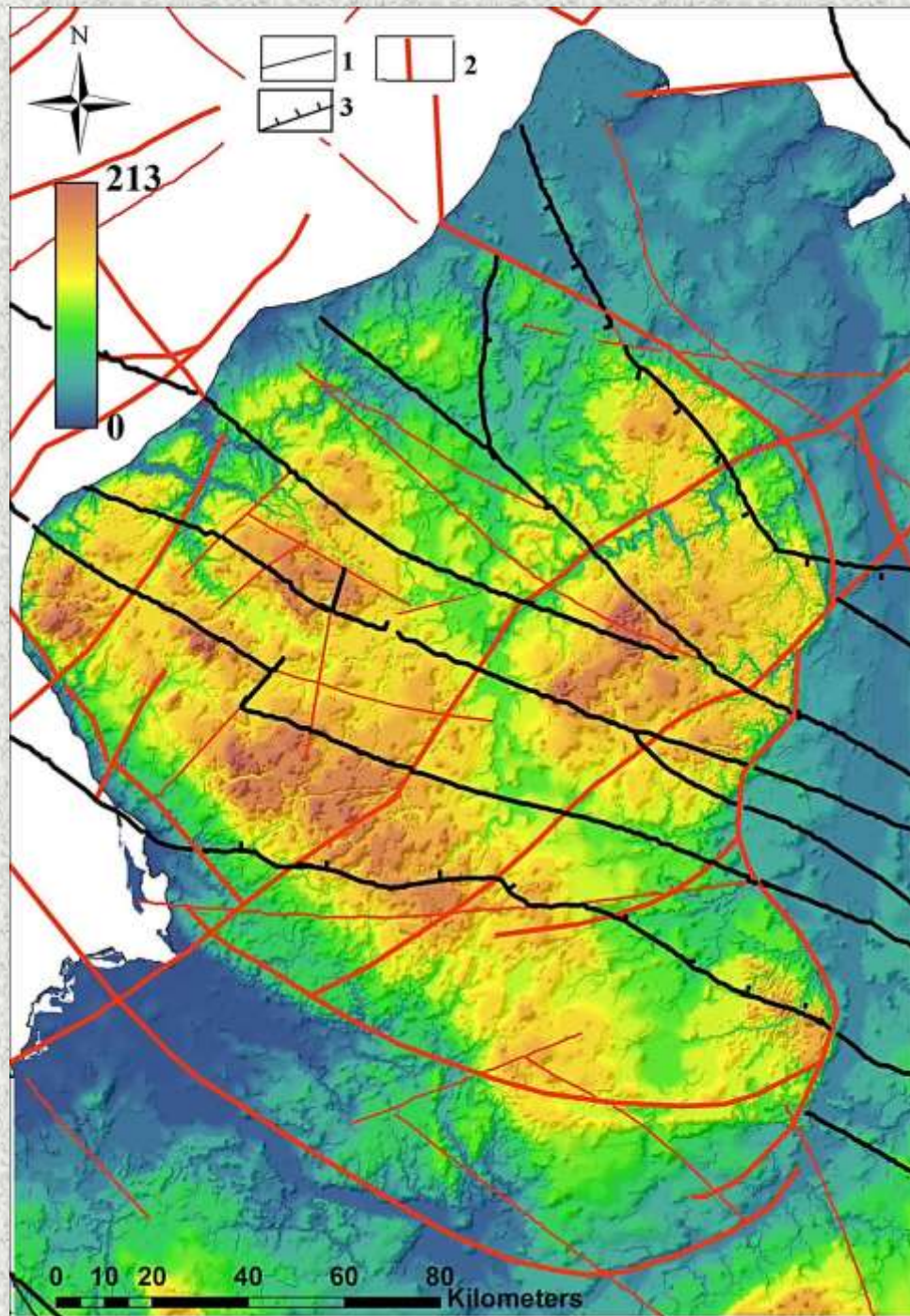


Схема сопоставления материалов (Кутинов, Чистова, 2004; Кутинов и др., 2012)

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



Сопоставление ЦМР с разломно-блоковой тектоникой Беломорско-Кулойского плато

Разломы фундамента
(Тектоническая карта..., 2010)

- 1- разломы с неустановленной кинематикой;
- 2 - разломы, активизированные на неотектоническом этапе;
- 3 – границы крупных тектонических структур

Цифровая модель глубины залегания фундамента



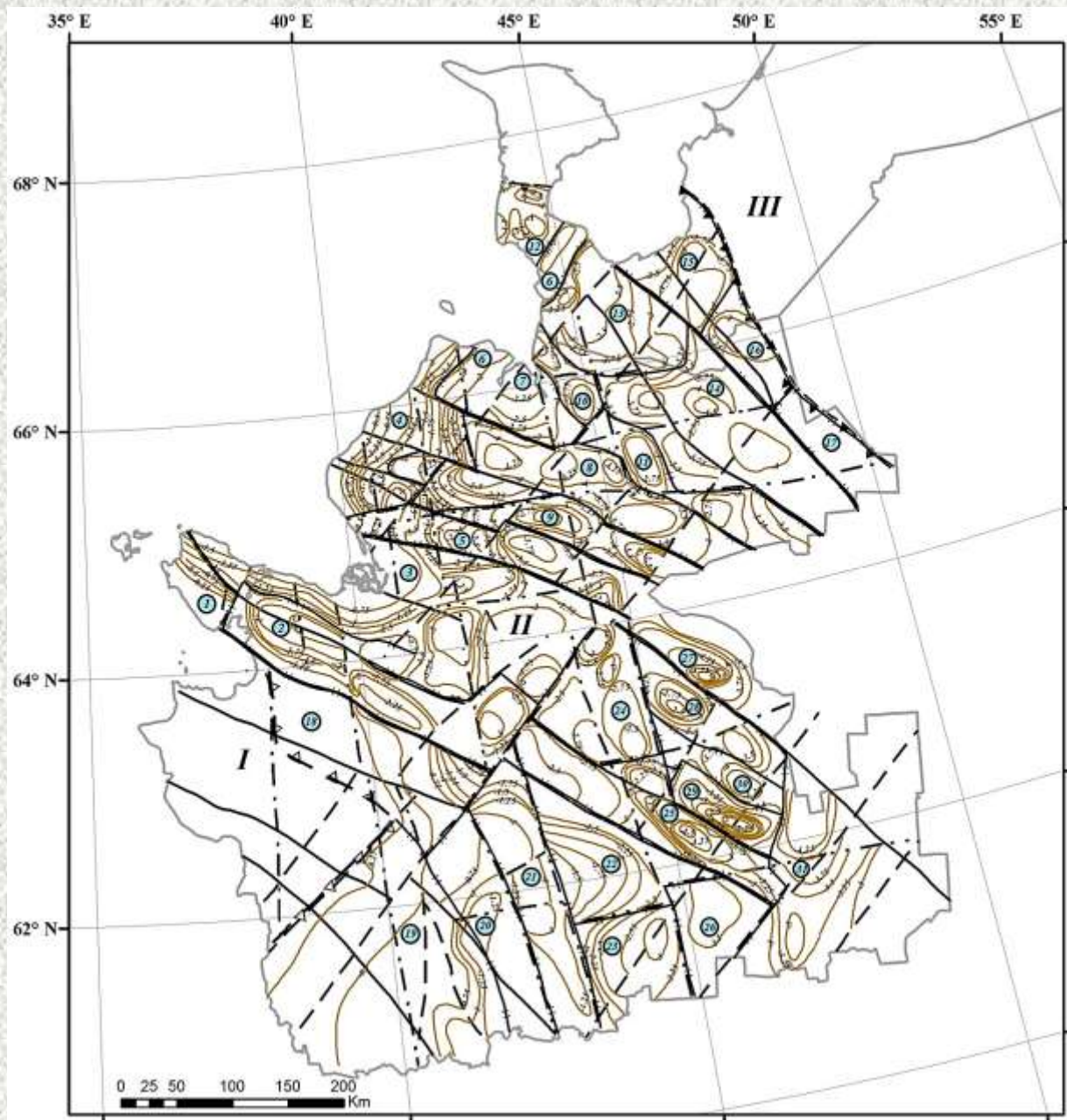
Данные о глубине залегания фундамента получены из «Карты поверхности рельефа фундамента» м-ба 1:1 000 000

(фондовый отчет: Березовский В.З., Широбоков В.Н., Губайдулина Л.В. и др. Составление карт глубинного строения и прогноза кимберлитового магматизма севера Восточно-Европейской платформы м-ба 1:1000000. Новодвинск: Архангельскгеология, 1988. 156 л.)

Процесс получения данных состоял из трех этапов:

1. Сканирование исходного материала;
2. Оцифровка изогипс глубин залегания фундамента;
3. Создание цифровой модели глубины залегания в среде ESRI ArcGIS 10 с применением модуля Topo to Raster.

Цифровая модель глубины залегания фундамента



- Изолинии глубин, км
 - Основные тектонические нарушения мантийного заложения
 - ▲ - Границы надпорядковых структур
 - Границы структур фундамента Русской плиты
 - ▲ - Западная граница Тиманского поднятия
- Тектоническое районирование:
- I* - Балтийский щит
 - II* - Русская плита
 - III* - Канино-Тиманское поднятие

Структуры фундамента Русской плиты:

Выступы и поднятия:

- 3 - Архангельский;
- 4 - Ручьевский;
- 7 - Кулойский;
- 9 - Полтинско-Ежугское;
- 11 - Койнаское;
- 12 - Канинский;
- 21 - Важское;
- 26 - Красноборский;
- 28 - Верхне-Выйское;
- 29 - Уфтыгское.

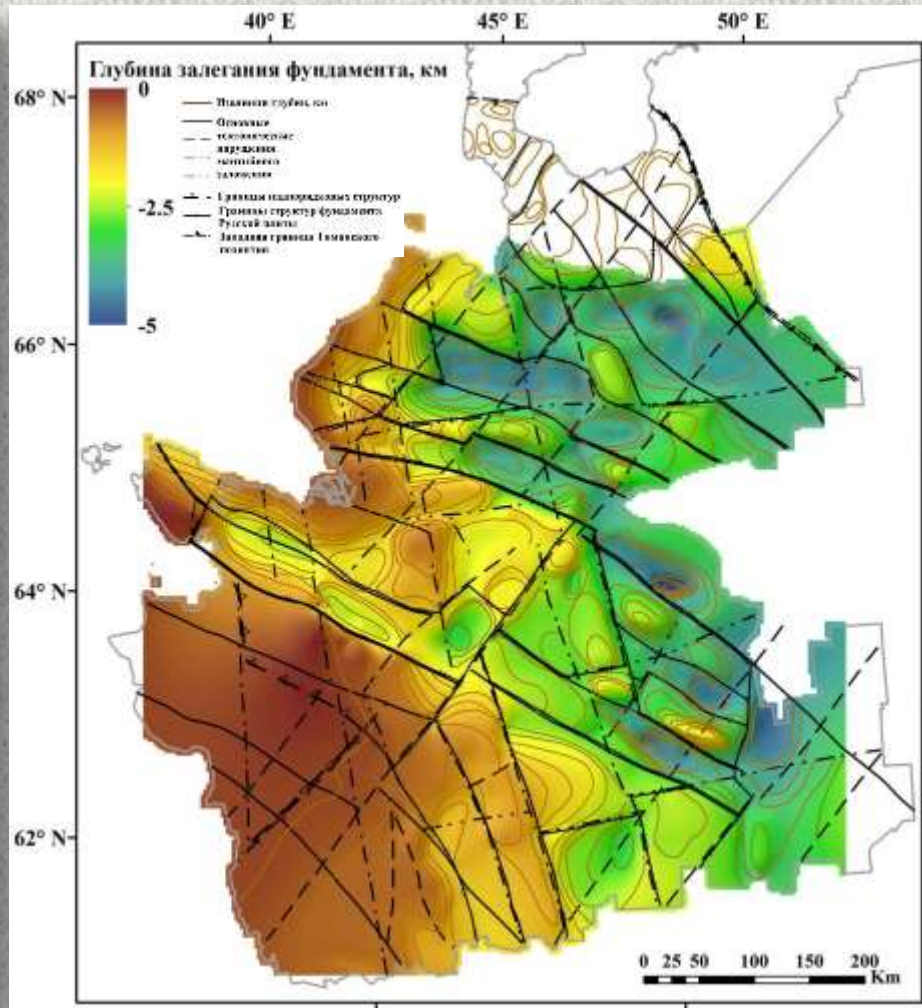
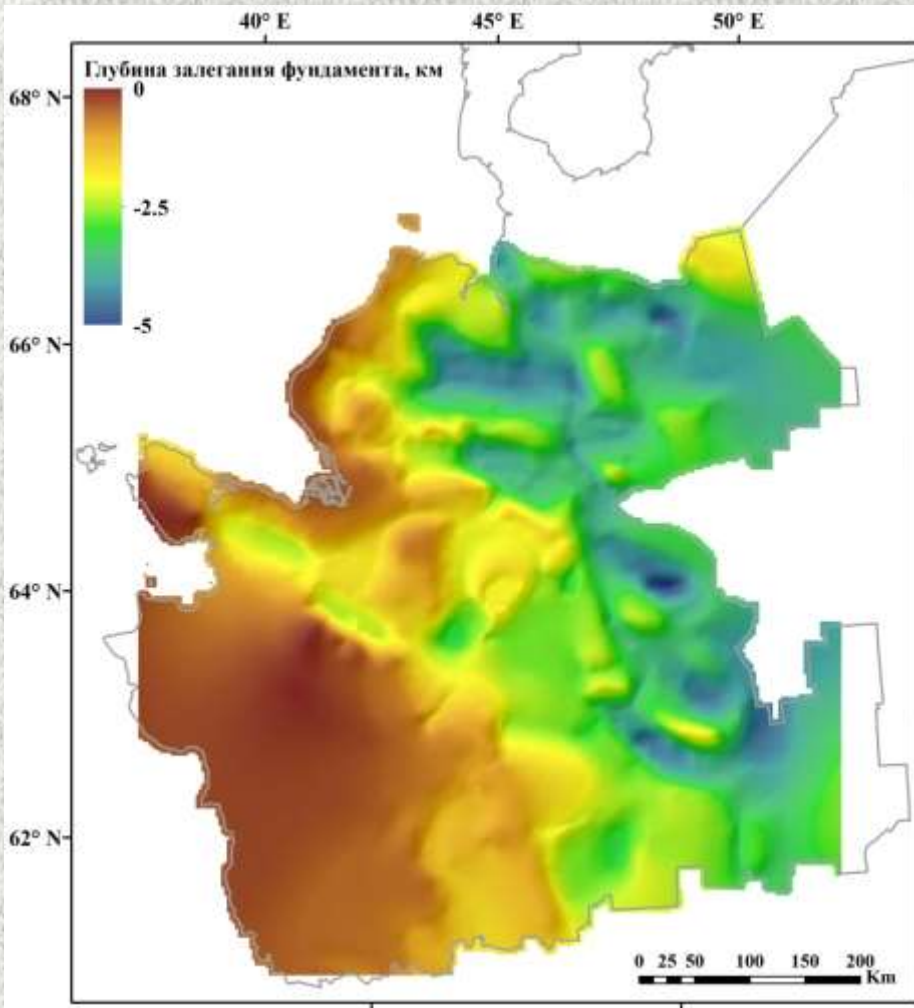
Грабени и впадины:

- 2 - Онежский;
- 5 - Керецкий;
- 6 - Нижаский;
- 8 - Лешуковский;
- 10 - Семжинский;
- 14 - Сафоновская;
- 15 - Пешская;
- 20 - Вельская;
- 23 - Шангальская;
- 25 - Тойменская;
- 27 - Среднепинежская;
- 30 - Верхнепинежская;
- 31 - Котласко-Яренская.

Тектонические ступени:

- 1 - Мядосозерская;
- 13 - Вижасская;
- 16 - Тылугская;
- 17 - Четласская;
- 18 - Онего-Важская;
- 19 - Вожелачская;
- 22 - Шенкурская;
- 24 - Среднепинежская.

Цифровая модель глубины залегания фундамента



Характер наследования структур фундамента в современном рельефе

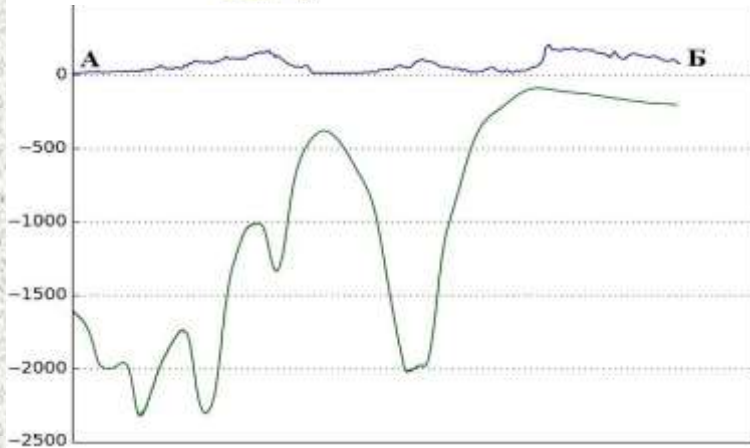
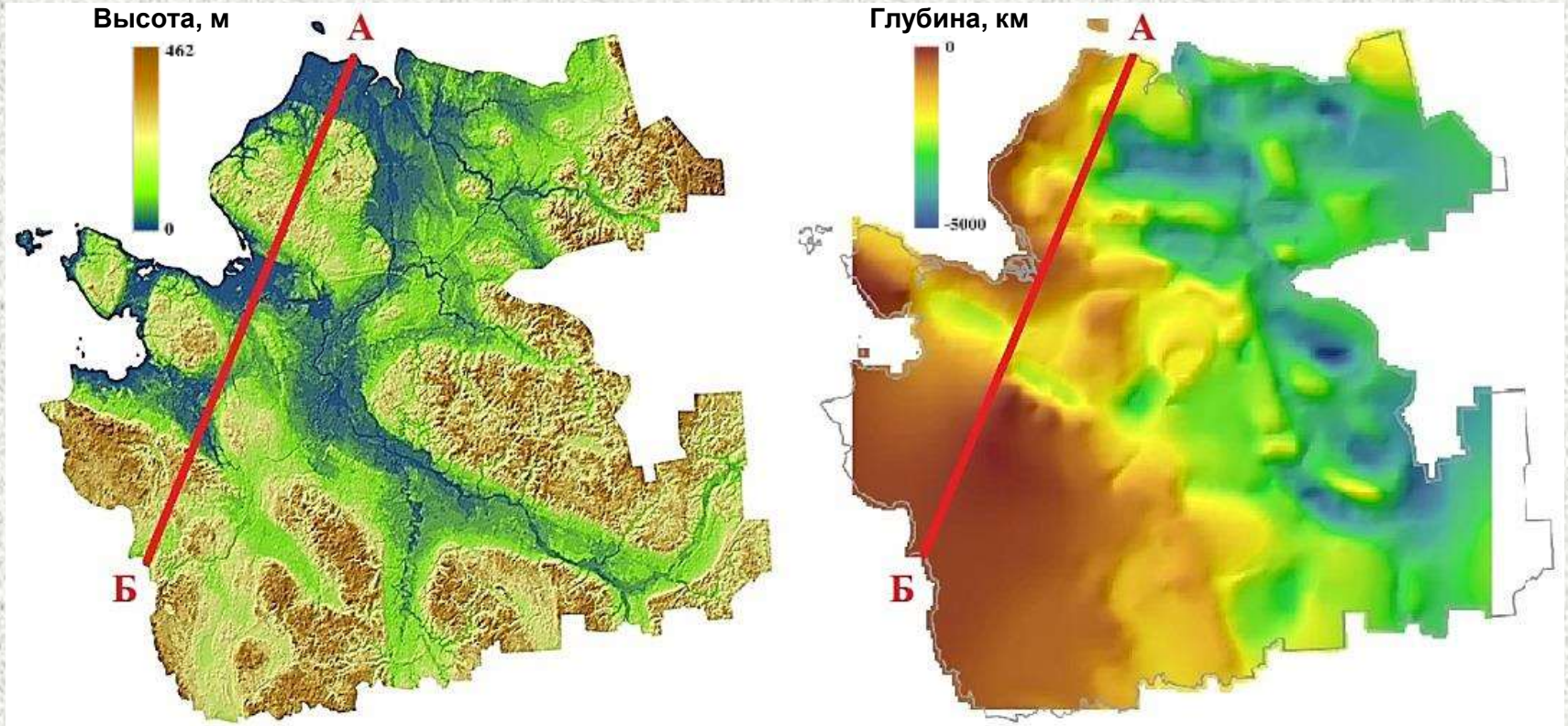


График профиля. Синим показана высота рельефа $R(x)$, зеленым глубина залегания фундамента $F(x)$

На территории области исследования (Архангельская область) высота рельефа земной поверхности измеряется десятками метров, а глубина залегания фундамента – километрами (тысячами метров).

Из-за порядка масштаба, анализ зависимости величин друг от друга графически представляется затруднительным.

Характер наследования структур фундамента в современном рельефе

Устранить порядок масштаба математически можно с помощью нормирования значений обеих величин в каком-то определенном диапазоне. Примем этот диапазон равным 0-1.

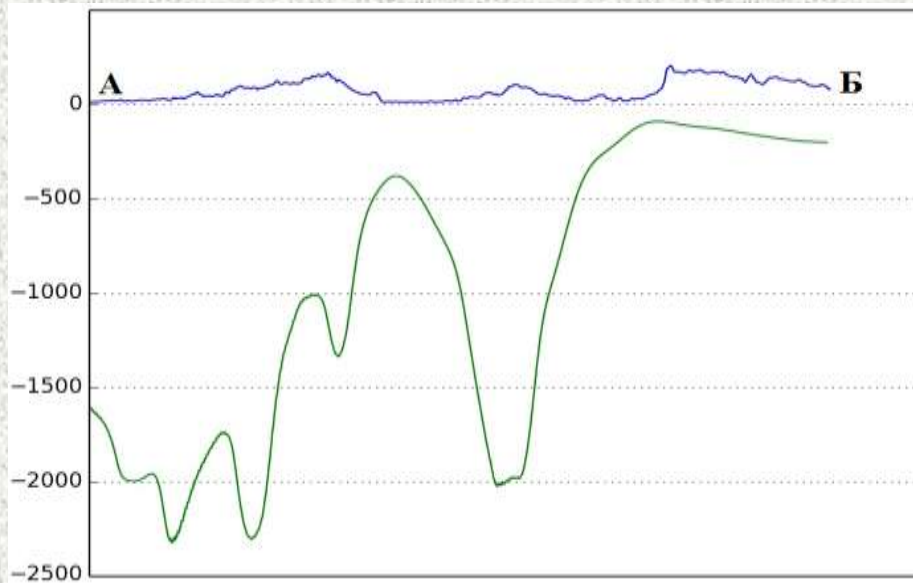


График профиля
Синим показана высота рельефа R(x),
зеленым глубина залегания
фундамента F(x)

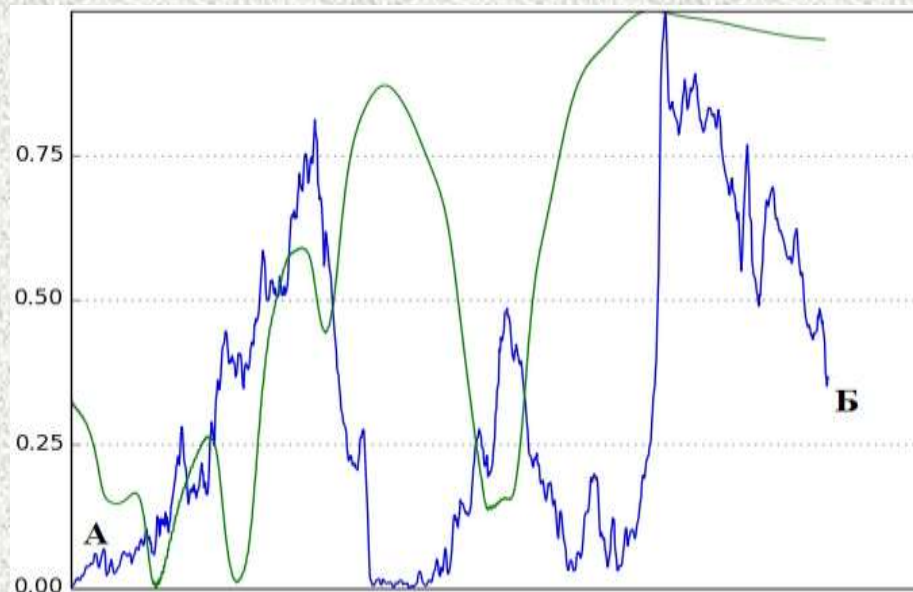


График профиля
Значения кривых нормированы в
диапазоне 0-1
Нормирование проводилось по
формуле:

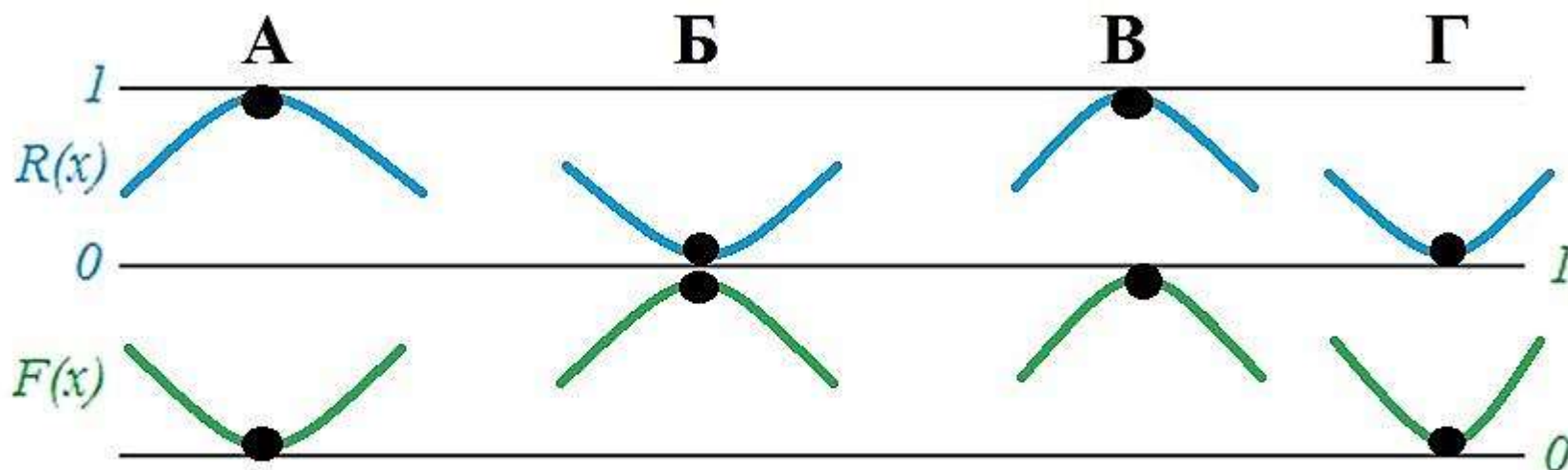
$$y' = \frac{y - y_{max}}{y_{max} - y_{min}}$$

0 – вогнутые формы
1 – выпуклые формы

Характер наследования структур фундамента в современном рельефе

Оценить зависимость функций $R(x)$ и $F(x)$ можно с помощью разности или суммы их нормированных значений в отдельных точках (например, в экстремумах).

Значения разностей и сумм нормированных значений описывают определенные формы рельефа фундамента и дневной поверхности.



$F(x) - R(x) =$	-1	1	0	0
$F(x) + R(x) =$	1	1	2	0

Разность и сумма нормированных значений функций:
А-Б – обратные (противоположные) формы;
В-Г – прямые (повторяющиеся) формы

Цифровые модели представлены в виде регулярных дискретных матриц. Значения их не нормированы в каком-то общем для обеих матриц диапазоне, поэтому на первом шаге анализа нормируем их значения в диапазоне 0-1 по формуле:

$$y' = \frac{y - y_{max}}{y_{max} - y_{min}}$$

В результате получаем матрицу нормированных значений глубины залегания фундамента MF_n и матрицу нормированных значений высоты рельефа поверхности MR_n . Тогда $M^- = MF_n - MR_n$ - матрица разности, а $M^+ = MF_n + MR_n$ - матрица суммы.

Таким образом, дальнейший анализ зависимости высоты рельефа земной поверхности и глубины залегания фундамента будем осуществлять на основе значений матриц разности и суммы, направленных на выявление обратных и прямых форм.

При этом **обратными формами** будем называть те участки области исследования, в которых одновременно с поднятием земной поверхности наблюдается опускание фундамента или одновременно с опусканием земной поверхности наблюдается поднятие фундамента. Характеризовать эти формы будут значения матрицы M^- , близкие к 1 или к -1.

Прямыми формами будем называть те участки области исследования, в которых одновременно с поднятием земной поверхности наблюдается поднятие фундамента или одновременно с опусканием земной поверхности наблюдается опускание фундамента. Характеризовать эти формы будут значения матрицы M^+ , близкие к 0 или к 2.

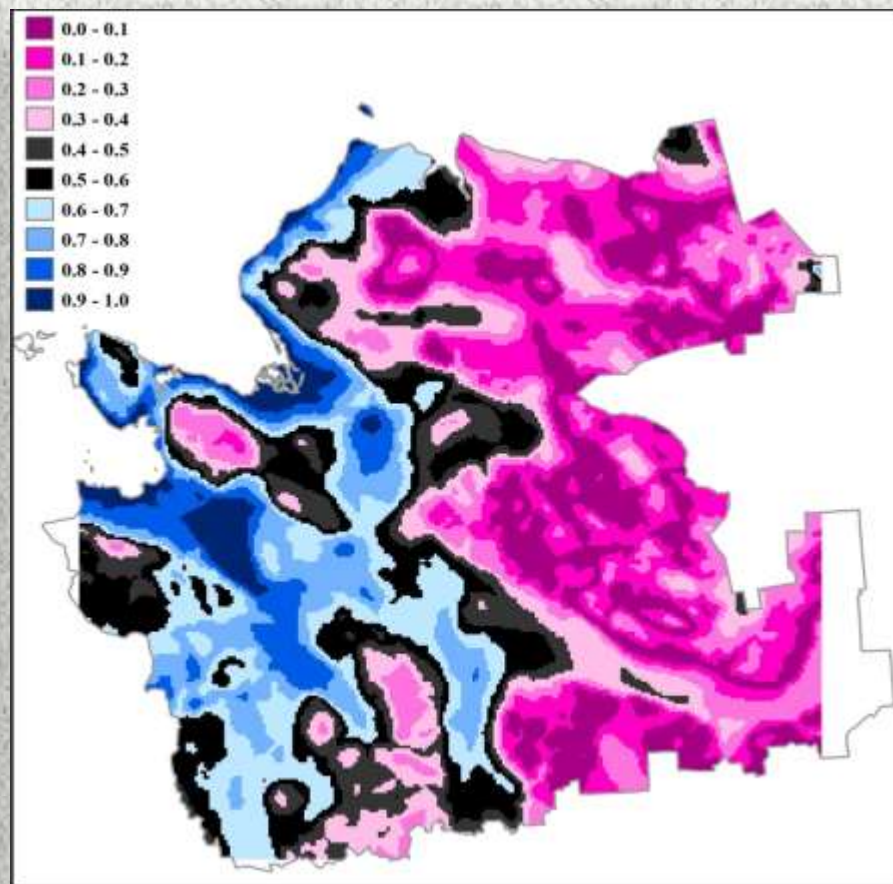
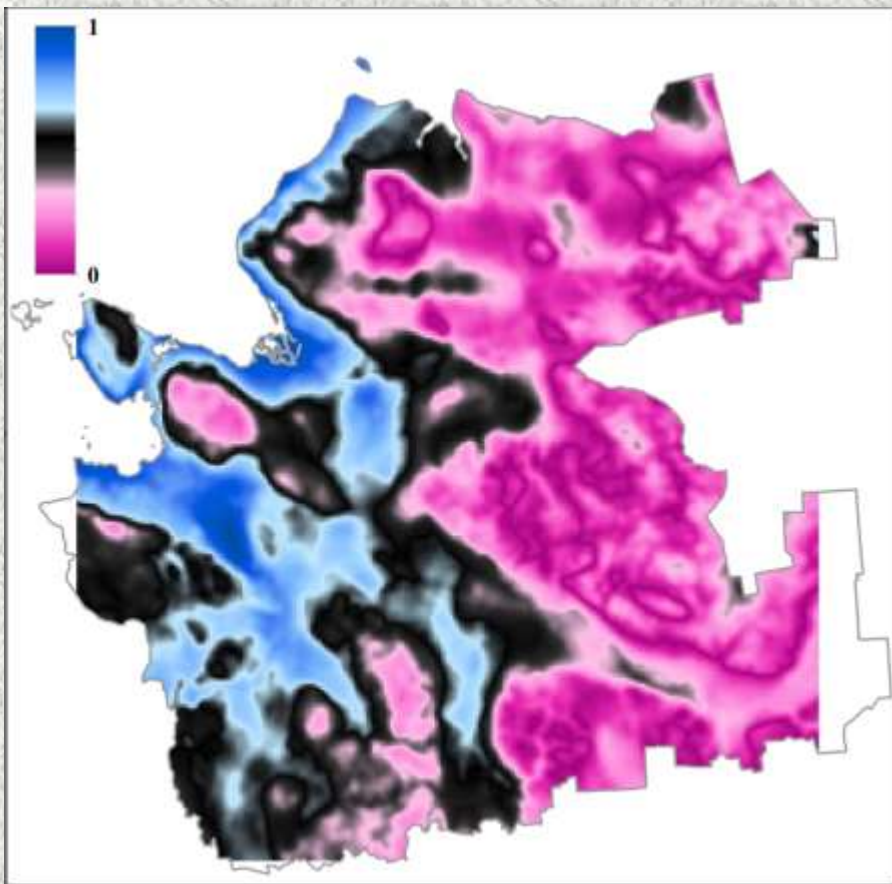
1 этап – выделение прямых и обратных форм

Задача 1 этапа – разделить область исследования на два типа форм (обратные и прямые).

Для этого введено понятие – абсолютная разница нормированных значений матриц высоты земной поверхности и глубины залегания фундамента $M^{abs} = |MF_n - MR_n|$.

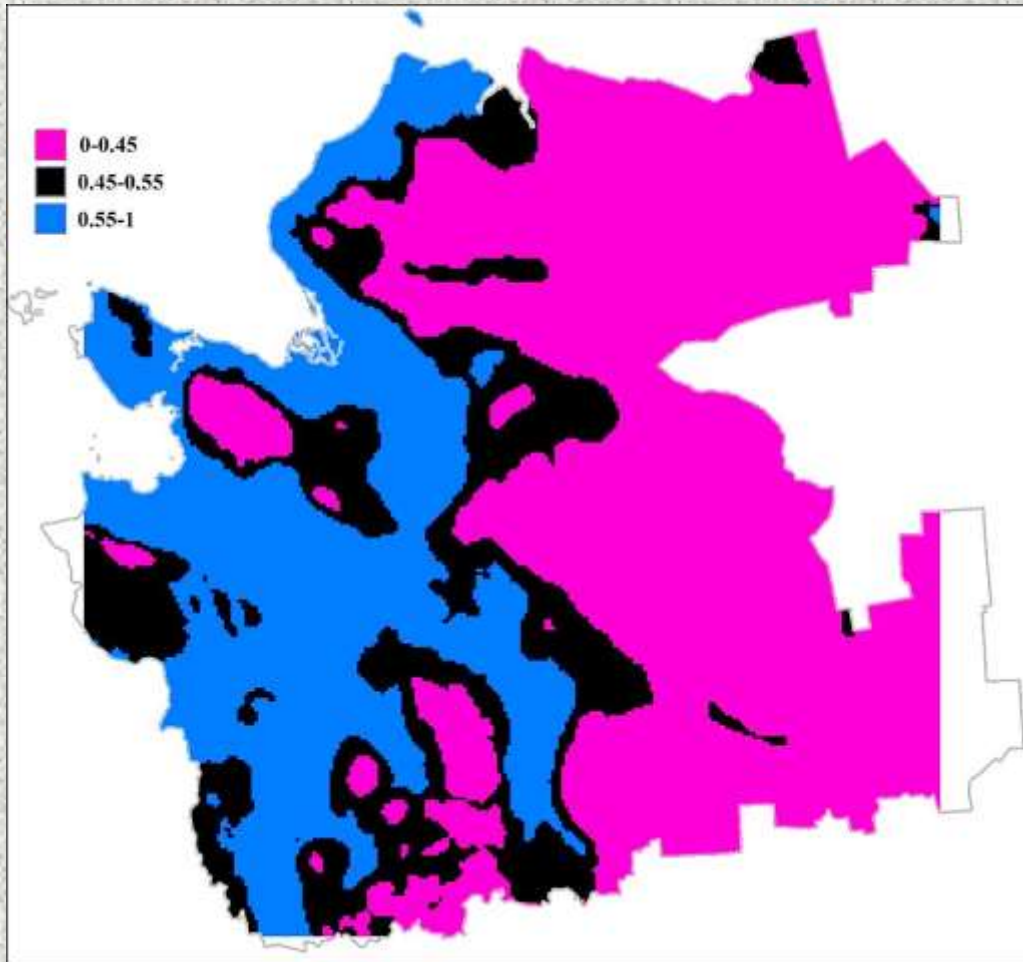
Имея в виду такое обозначение, можно говорить, что:

- 1) значения матрицы абсолютной разности M^{abs} , приближающиеся к 1, будут соответствовать обратным формам;
- 2) значения матрицы абсолютной разности M^{abs} , приближающиеся к 0, будут соответствовать прямым формам.



1 этап – выделение прямых и обратных форм

Если ограничить количество цветов до трех и каждому цвету назначить диапазон значений абсолютной разницы, можно поделить всю область исследования на две большие территории, одна из которых занята обратными формами, а другая прямыми



0-0.45 – прямые формы

0.55-1 – обратные формы

0.45-0.55 – переходные области

Статистика прямых и обратных форм на территории Архангельской области

Формы	Доля, %
Прямые	71
Обратные	29

2 этап – выделение внутренней структуры форм

Обратные формы по своей внутренней структуре делятся на два класса. Условно назовем их:

1) **впадина-выступ** – те участки области исследования, в которых одновременно с опусканием фундамента наблюдается поднятие земной поверхности, характеризовать эти участки будем значениями матрицы разницы, близкими к -1;

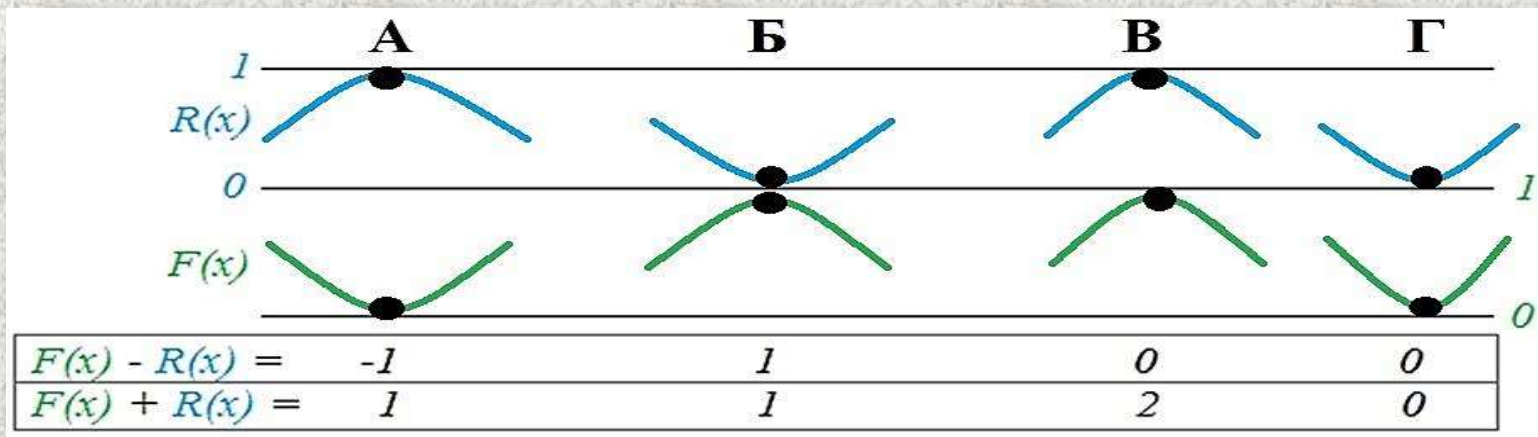
2) **выступ-впадина** – те участки области исследования, в которых одновременно с поднятием фундамента наблюдается опускание земной поверхности, характеризовать эти участки будем значениями матрицы разности, близкими к 1.

Прямые формы в свою очередь так же делятся по своей внутренней структуре на два класса:

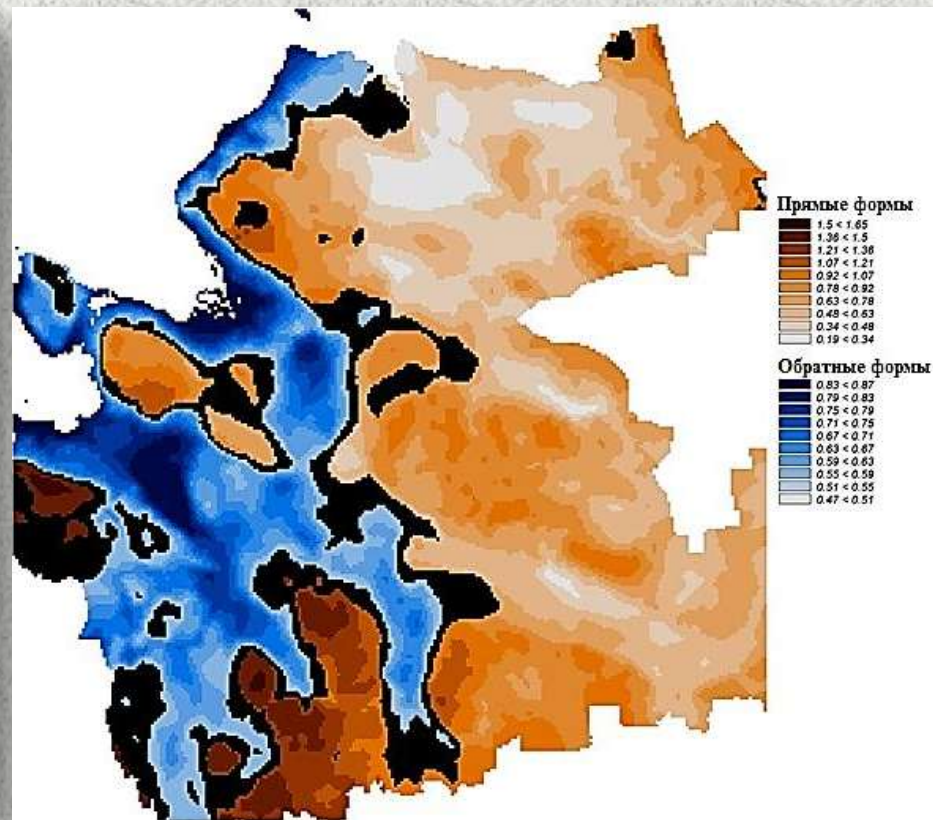
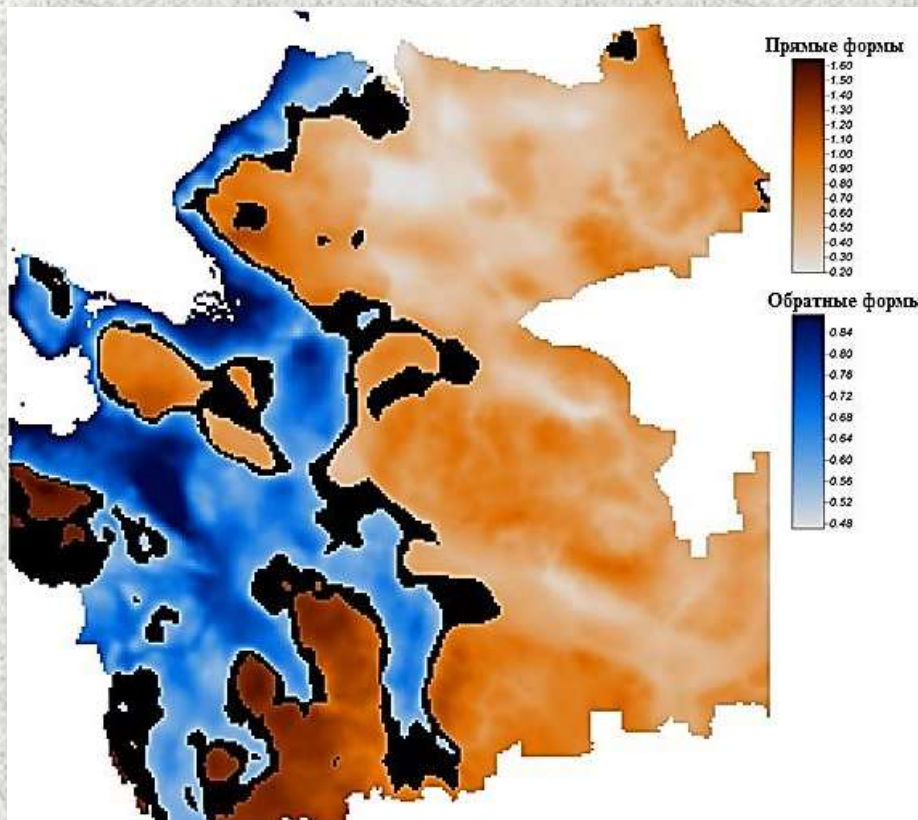
1) **выступ-выступ** – те участки области исследования, в которых одновременно с поднятием фундамента наблюдается поднятие земной поверхности, характеризовать эти участки будем значениями матрицы суммы, близкими к 2;

2) **впадина-впадина** – те участки области исследования, в которых одновременно с опусканием фундамента наблюдается опускание земной поверхности, характеризовать эти участки будем значениями матрицы суммы, близкими к 0.

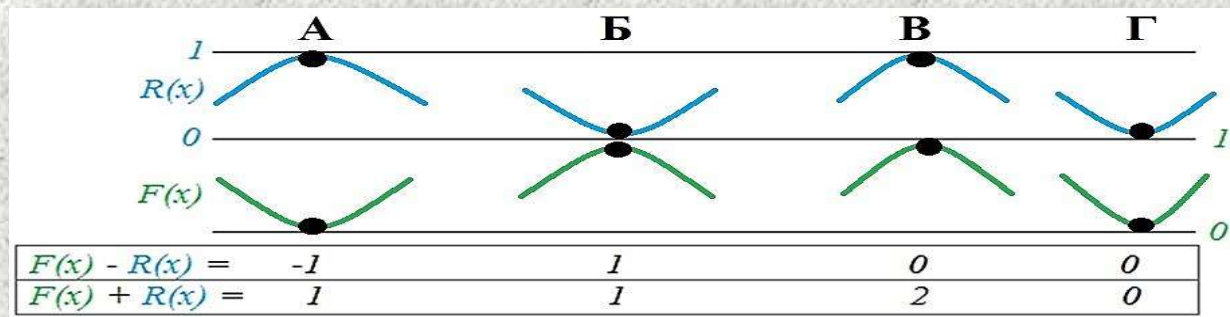
Комбинируя значения разницы и суммы таким способом, можно провести районирование территории по формам наследования структур.

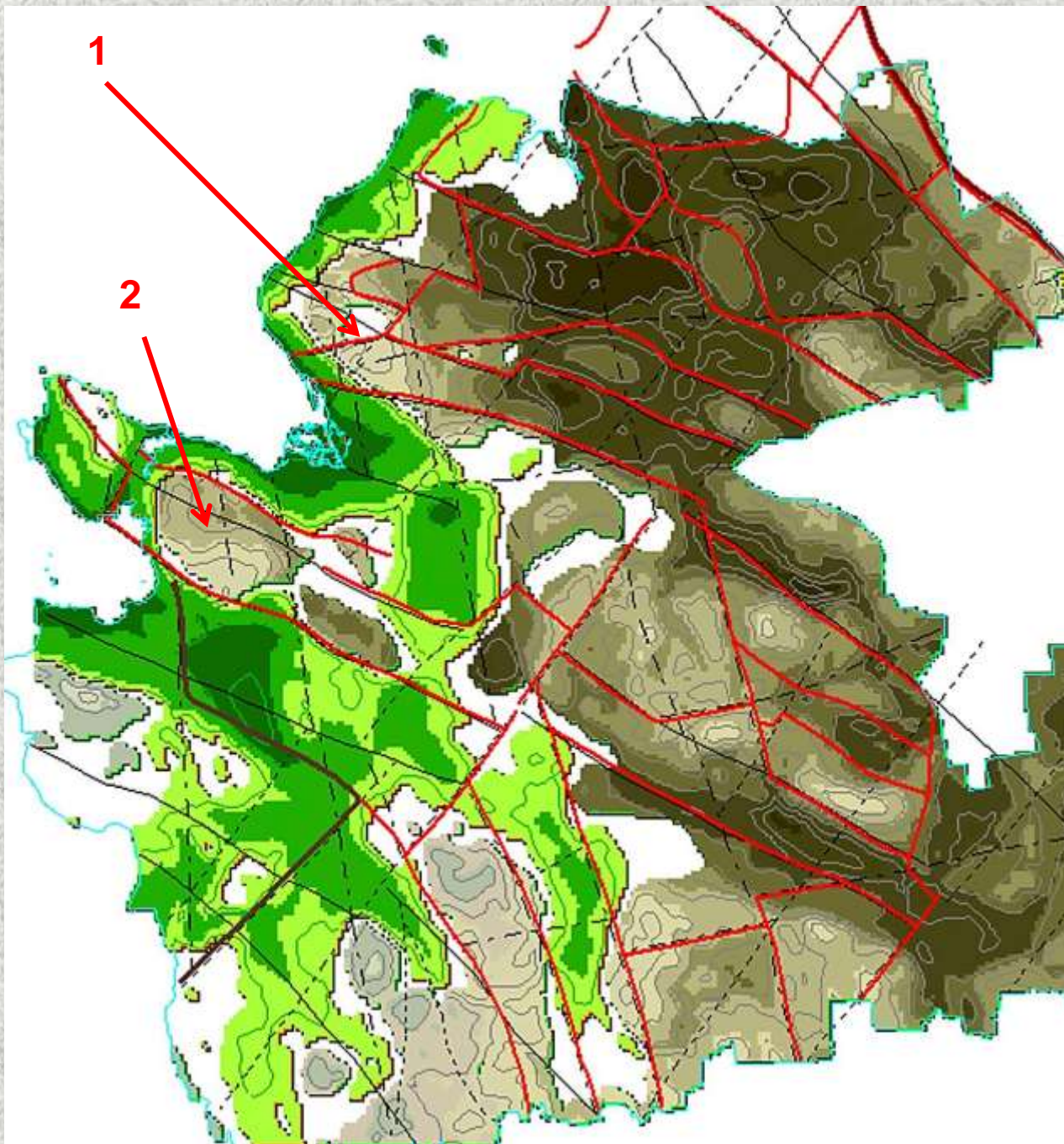


2 этап – выделение внутренней структуры форм



- 1) области оранжевого цвета – это прямые формы (светло-оранжевый цвет описывает класс впадина-впадина; темно-оранжевый – выступ-выступ);
- 2) области голубого цвета – это обратные формы (светло-голубой цвет описывает класс впадина-выступ; темно-голубой – выступ-впадина).





**1 – Зимнебережный
кимберлитовый
район**

**2 – Ненокское и
Белозерское поля**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

