

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Кафедра теплофизики

Магистерская диссертация

**Оценка геодинамической опасности протяженной урбанизированной
территории на основе экспериментальных исследований**

Научный руководитель Перетокин С.А.

Выпускник

Панин А.С.

Задачи

- Изучить геодинамику региона, включающее исследование протяженного объекта
- Уточнить карты ОСР для изучаемого протяженного объекта
- Уточнить коэффициенты расчетных геомodelей для оценки скоростей распространения сейсмических волн в геосреде включающие геодинамические исследования территории
- Разработать схему перехода от балльности к ускорению для оценки сейсмической опасности

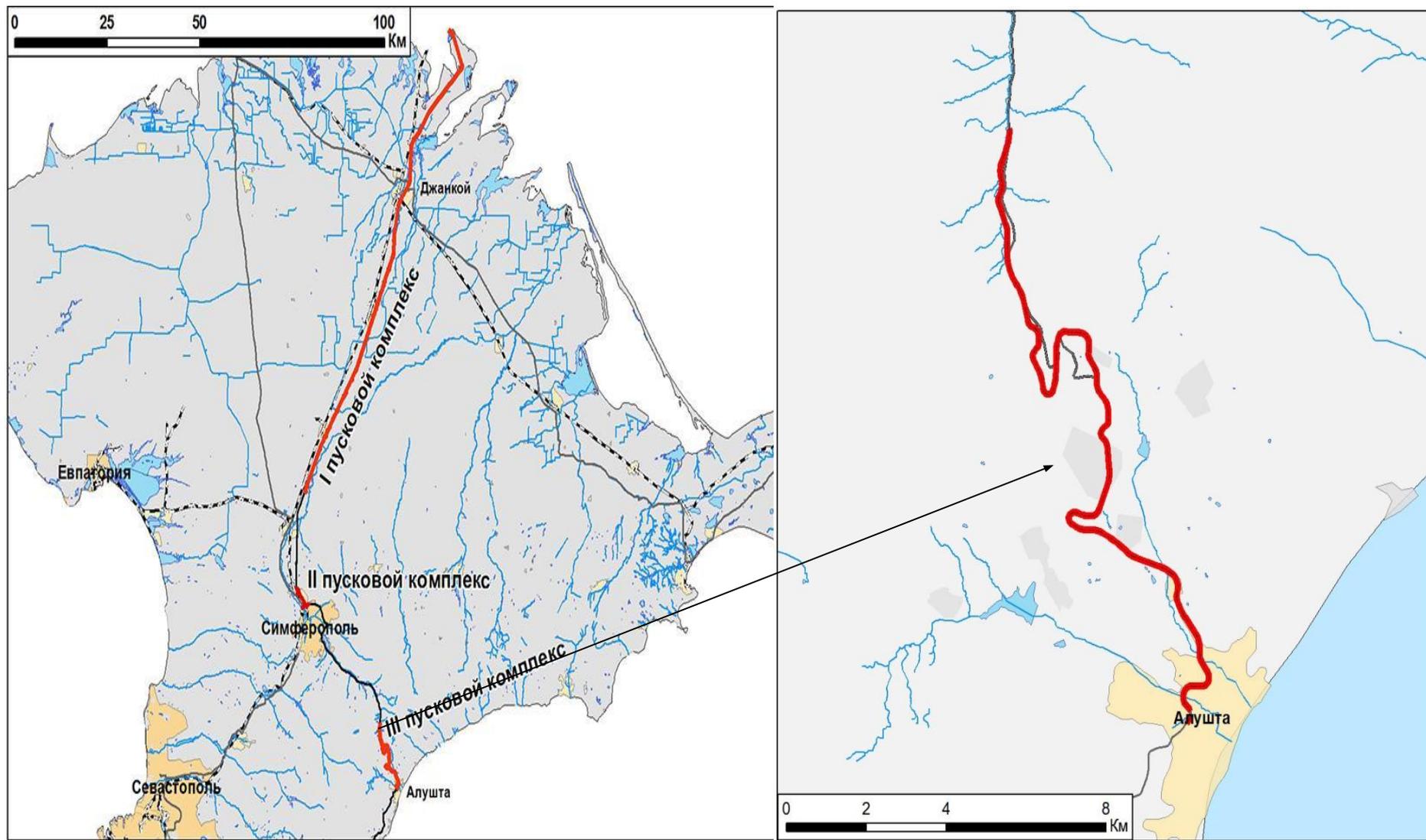


Рисунок 1 – Схема расположения участков работ (красная линия)

Физико-географическая карта Крыма



- Пояснения: Пунктиром показаны 30 и 100 километровые зоны вдоль трассы «Алушта-Симферополь-Джанкой-граница с Украиной».

Тектоническая схема Крыма и сопредельных территорий (акваторий)

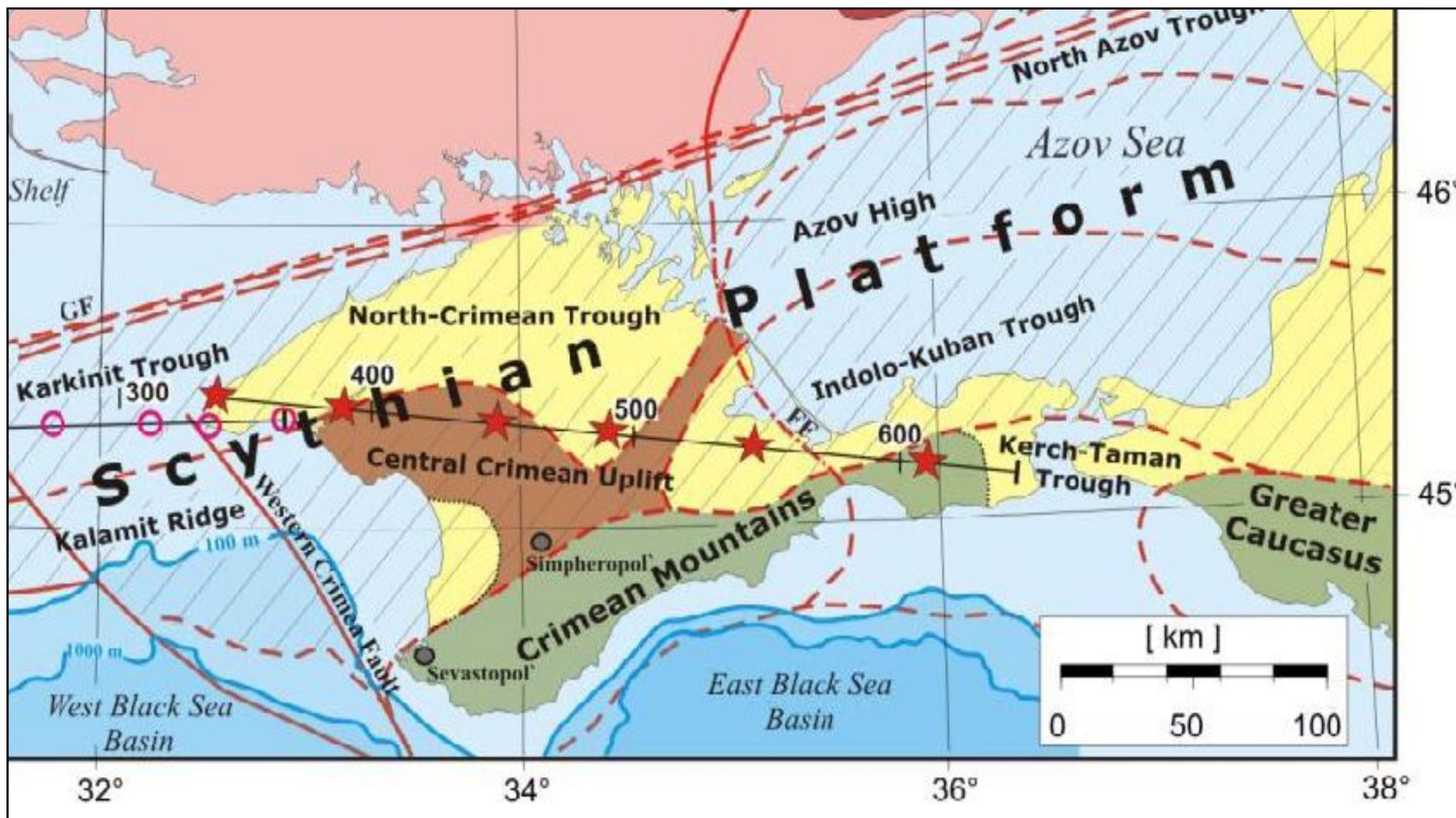
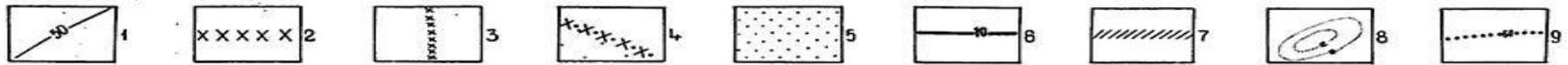
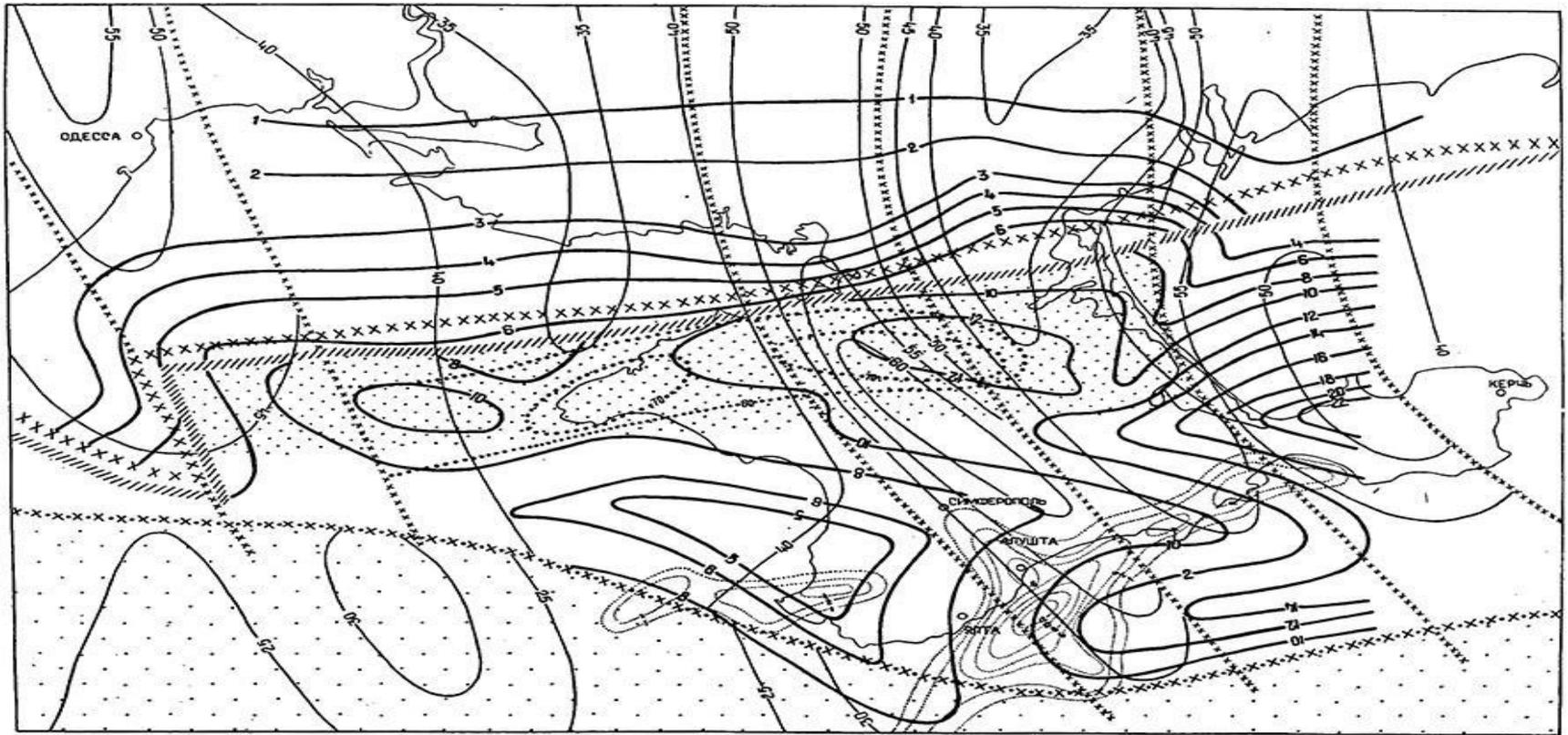
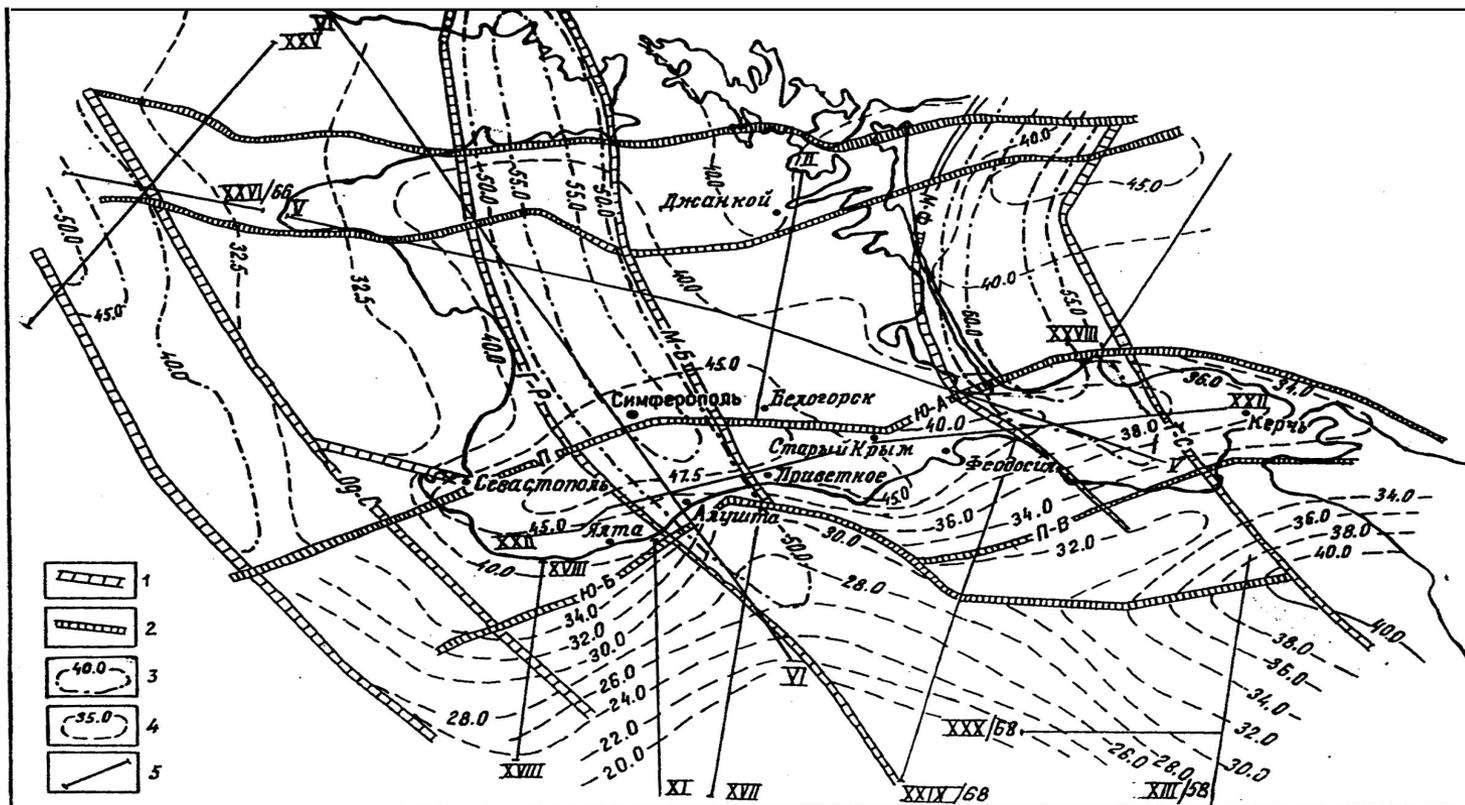


Схема глубинного строения земной коры Крымского региона



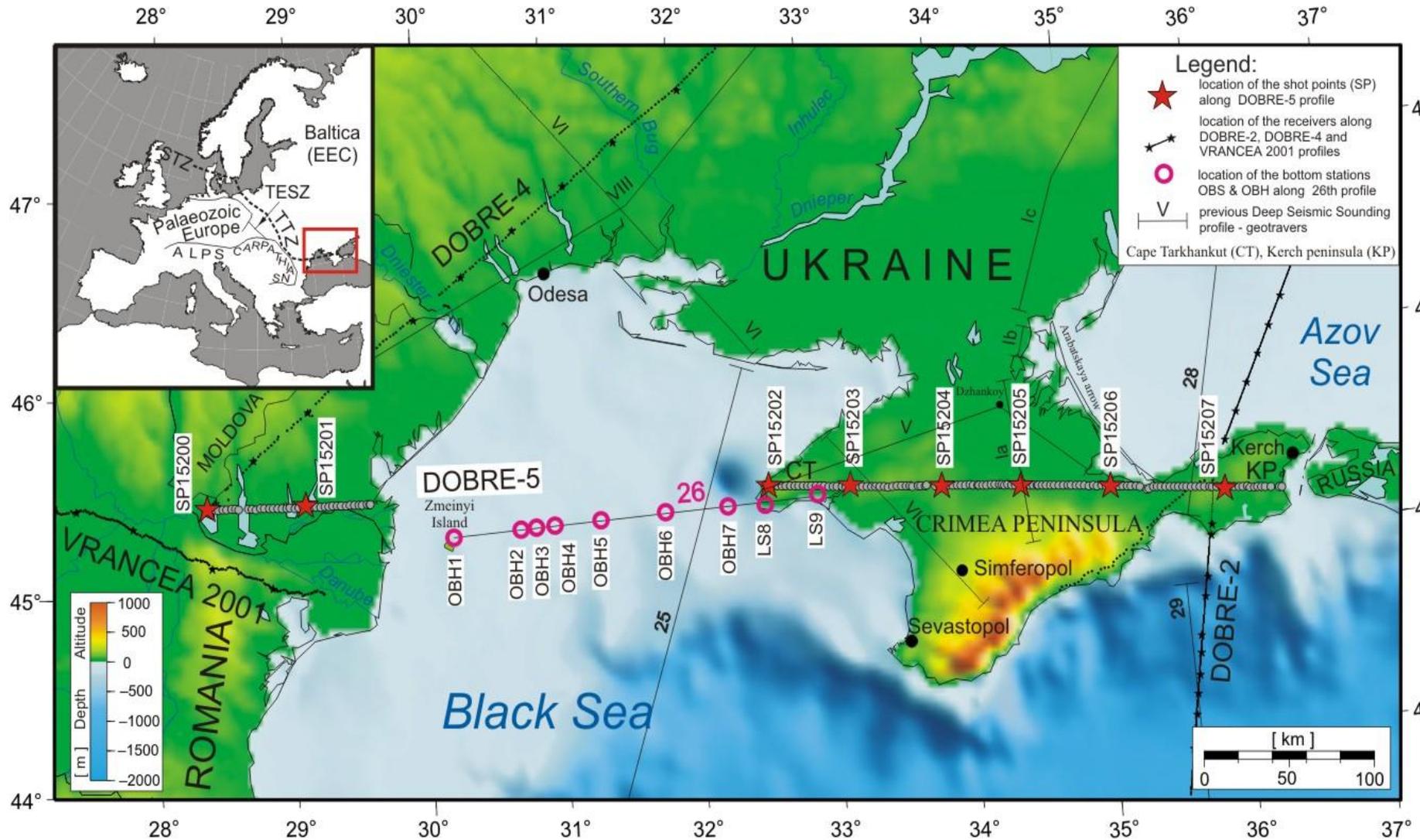
Условные обозначения: 1 – изогипсы поверхности Мохо; 2 – граница Восточно-Европейской платформы в структуре поверхности Мохо; 3 – глубинные (мантийные) разломы; 4 – Одер-Кавказский линеймент и субокеаническая кора Черноморской впадины; 5 – изогипсы поверхности дорифейского кристаллического фундамента (гранитного субстрата); 7 – граница Восточно-Европейской платформы в структуре поверхности дорифейского кристаллического фундамента; 8 – плотность сейсмогенных дислокаций; 9 – изолинии плотности теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$).

Схема рельефа поверхностей Мохо в пределах Крымско-Черноморского региона



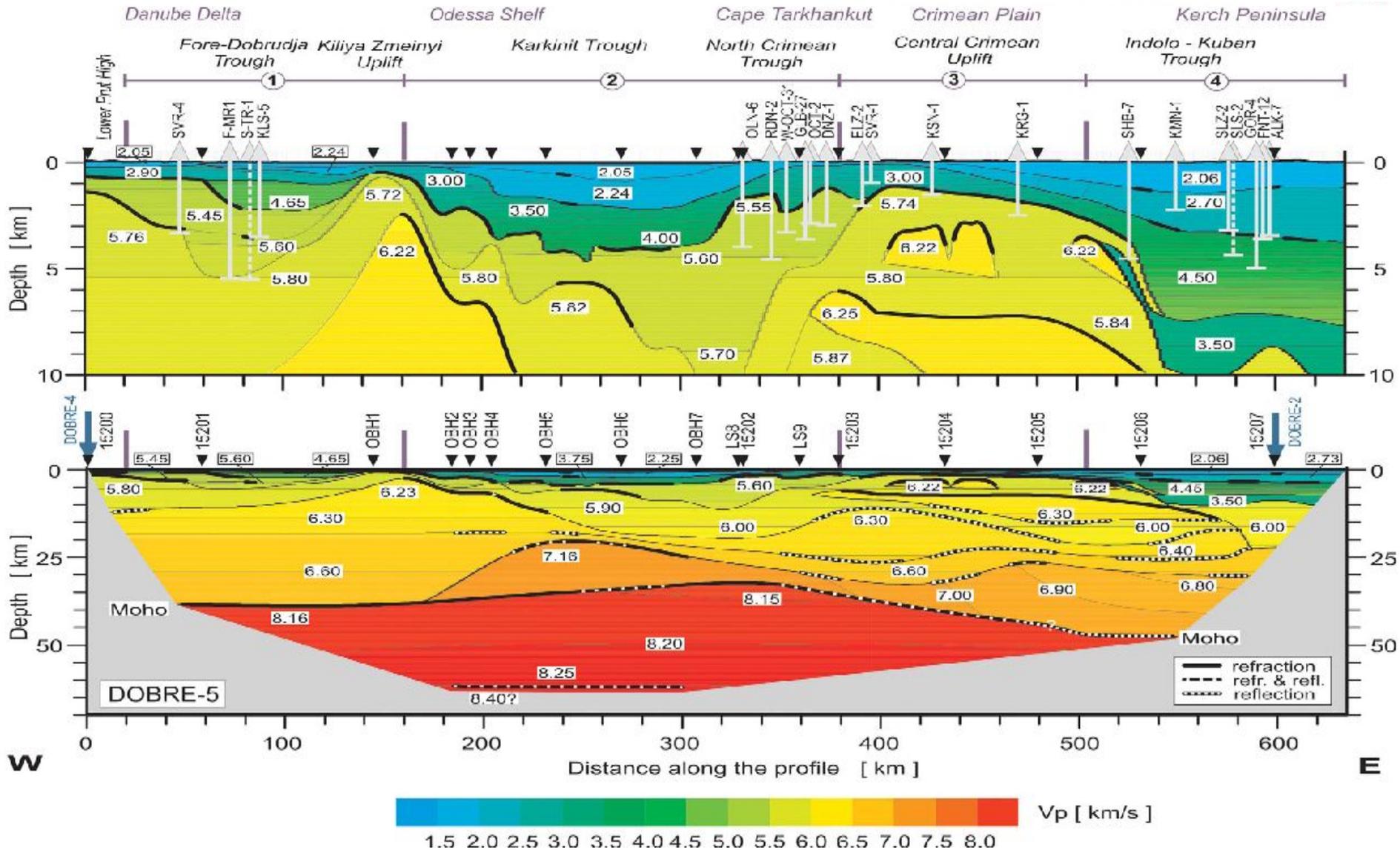
Условные обозначения: 1 – разломно-флексурные зоны, ограничивающие раннепротерозойские трюги; 2 – разломно-флексурные зоны, ограничивающие киммерийские трюги; 3 – изолинии глубин залегания поверхности Мохо M_2 в пределах раннепротерозойских трюгов; 4 – изолинии глубин залегания более молодых (в т.ч., киммерийской) поверхностей M_1 и M ; 5 – Профили ГСЗ. Глубинные разломы: Од-С – Одесско-Синопский, Г-Р – Гурзуфский, М-Л – Молбайский, П – Предгорный, Ю-Б – Южнобережный, Ю-А – Южно-Азовский, П-В – Правдинский, М-Ф – Мелитопольско-Феодосийский, Г-С – Горностаевский.

Положение профиля DOBRE-5

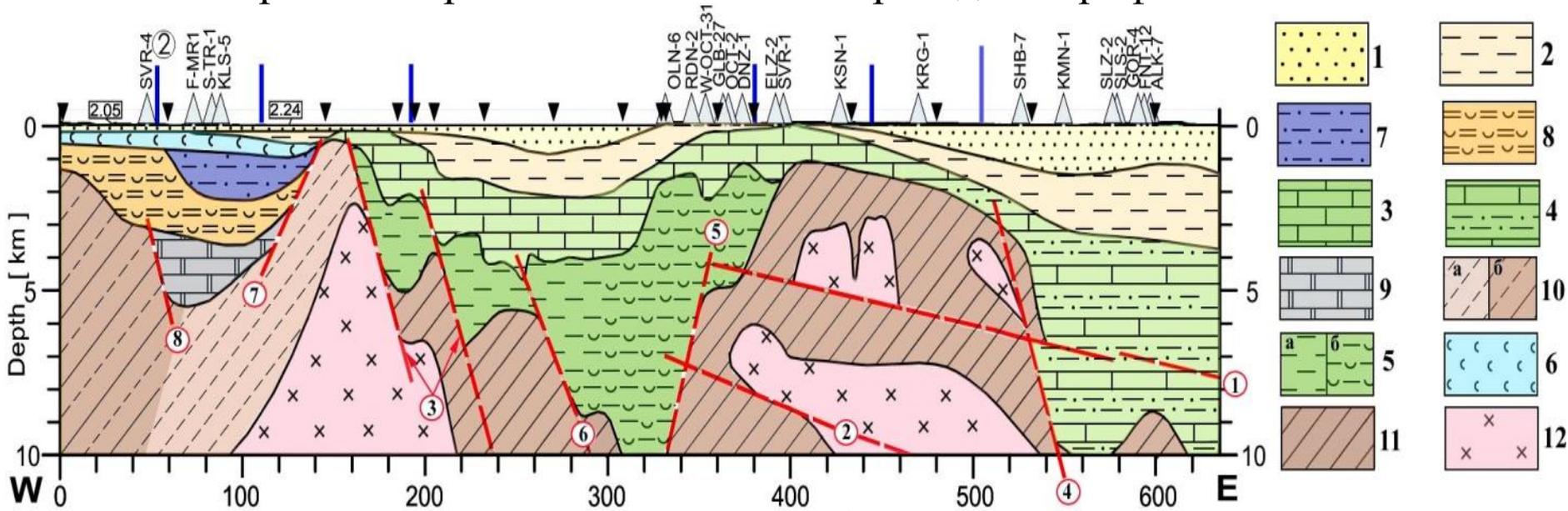


Пояснения: Звездочками отмечены пункты взрывов.

Скоростная модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля DOBRE-5

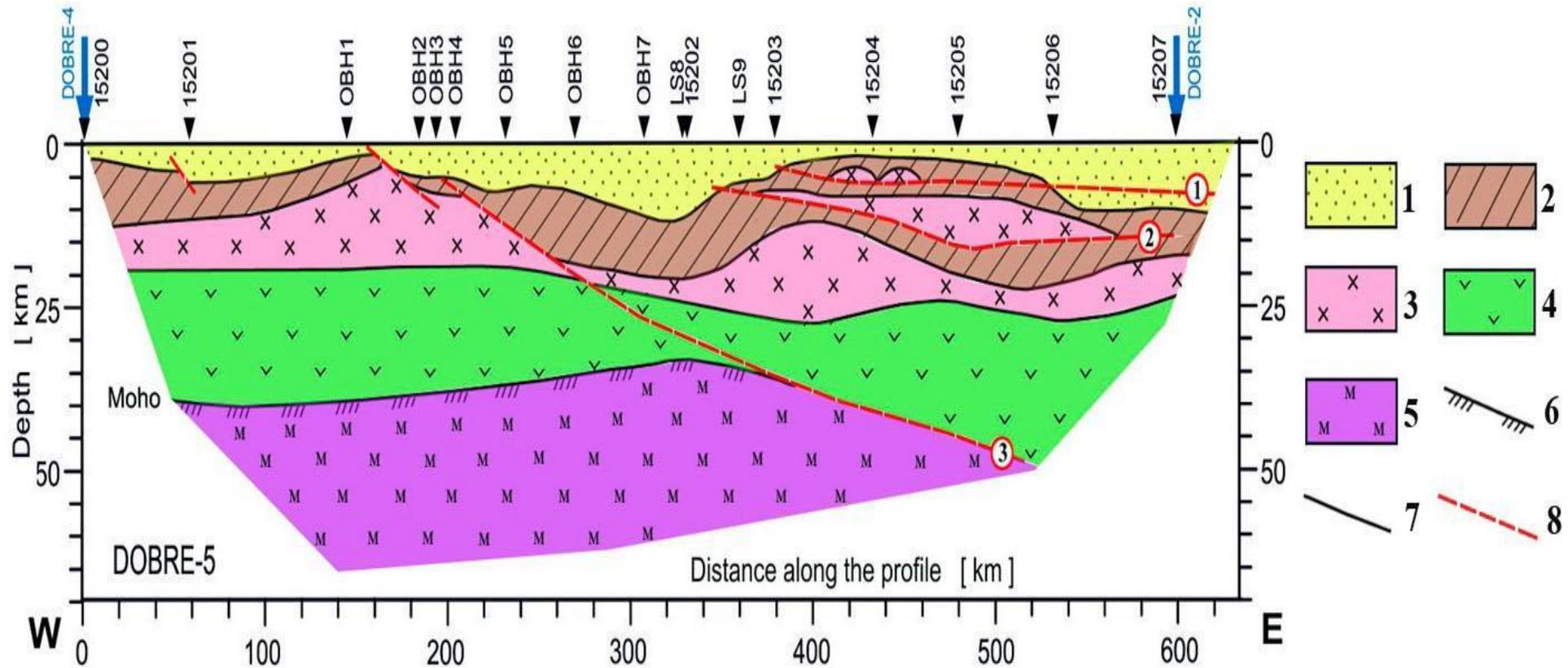


Строение верхней части земной коры вдоль профиля DOBRE-5



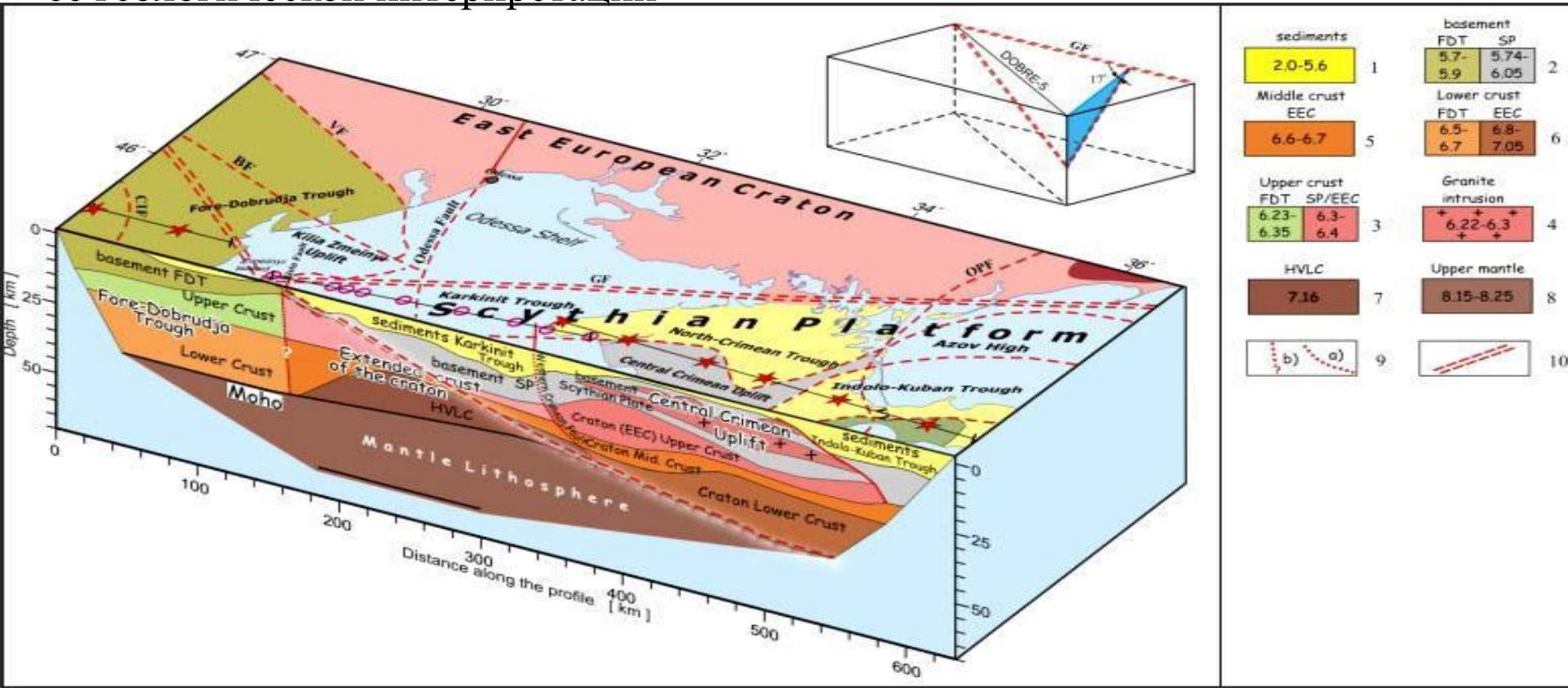
Условные обозначения: 1-9 – литолого-стратиграфические комплексы осадочного чехла: 1 – среднемиоцен-четвертичный; 2 – эоцен-олигоценый (Преддобруджского) и олигоцен-нижнемиоценовый (Каркинитско-Северокрымского и Индоло-Кубанского) прогибов; 3 – верхнемеловой-эоценовый Каркинитско-Северокрымского прогиба; 4 – нижнемеловой-эоценовый Индоло-Кубанского прогиба; 5 – ниже-верхнемеловой (альб-сеноманский) терригенный (а) и терригенно-вулканогенный (б) Каркинитско-Северокрымского прогиба; 6 – среднеюрский-нижнемеловой; 7 – триасовый; 8 – пермский; 9 – среднедевонский-карбоновый; 10 – рифейско-нижнедевонский нерасчлененный комплекс платформенного чехла Приднестровского склона Восточно-Европейской платформы (а), синхронные ему отложения Северной Добруджи, переработанные в байкальскую и варисскую эпохи (б); 11 – байкальско-киммерийское гетерогенное основание Скифской плиты; 12 – дорифейский гранитно-гнейсовый субстрат. Цифры в кружках – зоны разломов (описание см. в следующем подразделе).

Глубинное строение региона вдоль профиля DOBRE-5



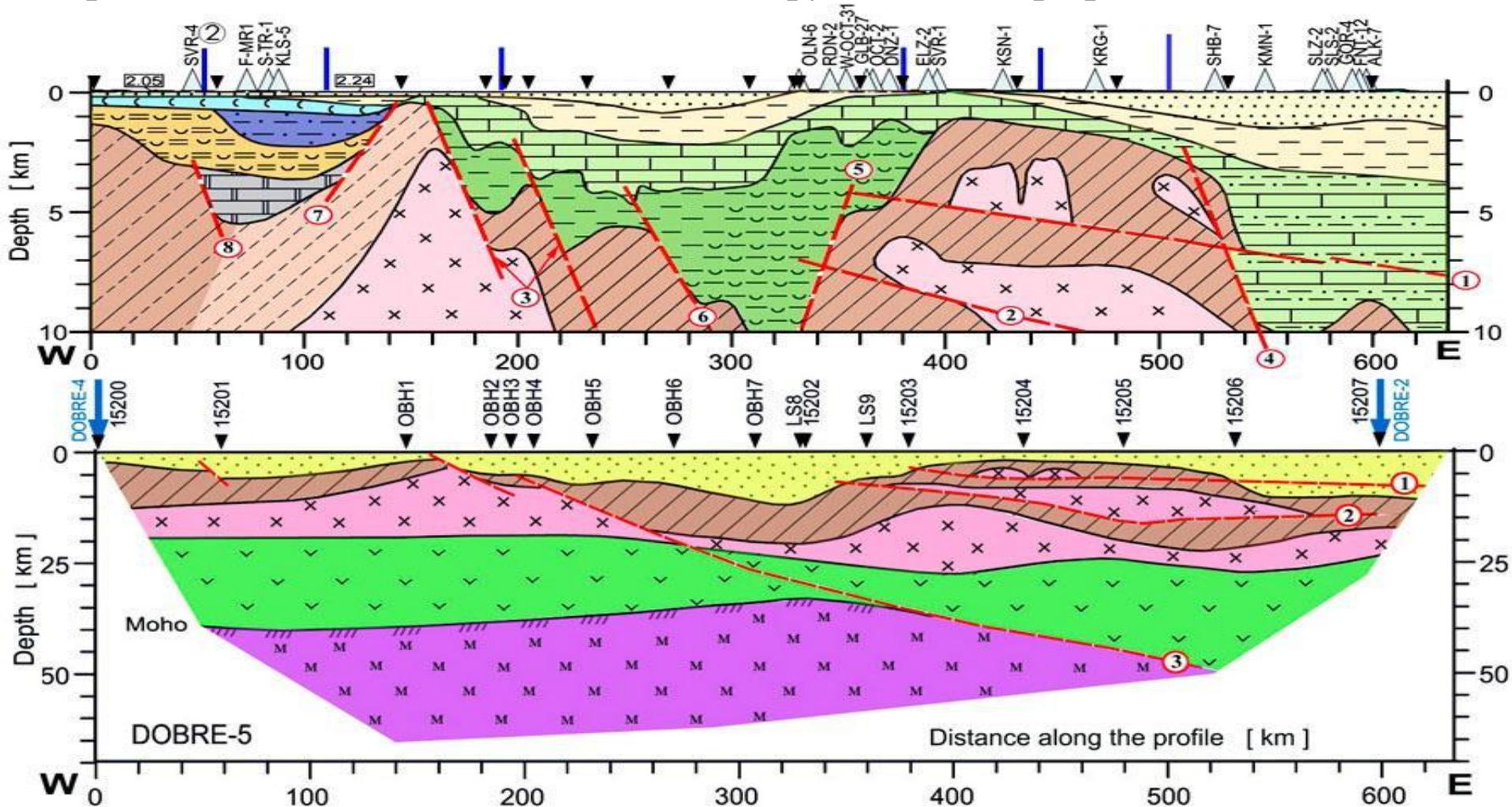
Условные обозначения: 1 – осадочный чехол; 2 – байкало-киммерийское гетерогенное основание Скифской плиты; 3 – «гранитный» слой (верхняя кора); 4 – «Базальтовый» слой (нижняя кора); 5 – верхняя мантия; 6 – раздел Мохо; 7 – границы в земной коре; 8 – тектонические нарушения

Трехмерная модель (блок-диаграмма) строения исследуемого региона, интегрирующая данные скоростной модели по профилю DOBRE-5 и результаты ее геологической интерпретации

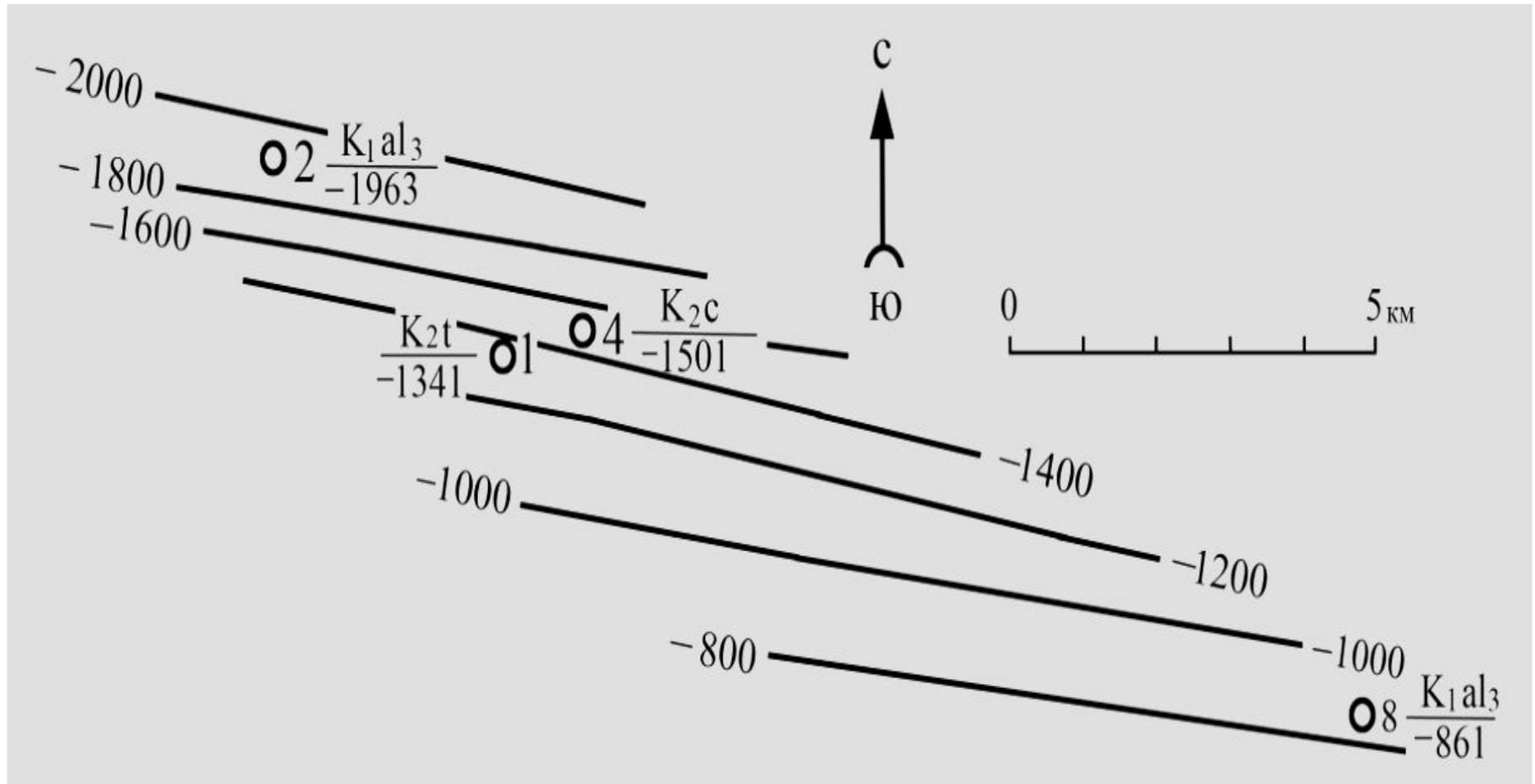


Условные обозначения: 1-8 – структурно-тектонические элементы региона и их скоростные характеристики; 9 – зоны тектонических нарушений: а) установленные по изменениям волнового поля, б) не имеющие четкого отражения в сейсмических разрезах; 10 – положение границы между Восточно-Европейской платформой и Скифской плитой. Вставка-диаграмма показывает истинный угол погружения (17°) этой границы.

Предполагаемые зоны тектонических нарушений на профиле DOBRE-5

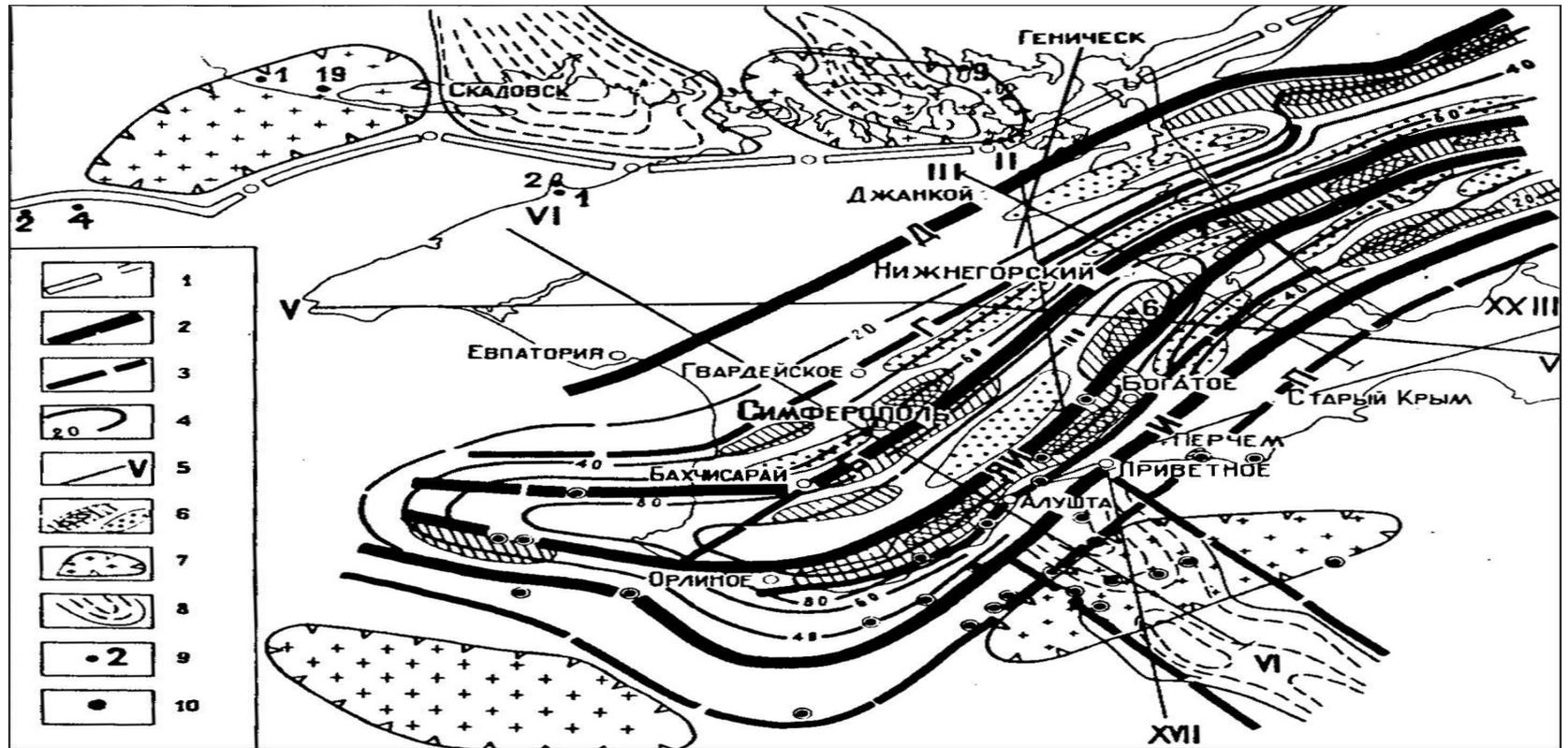


Результаты параметризации Березовского надвига.



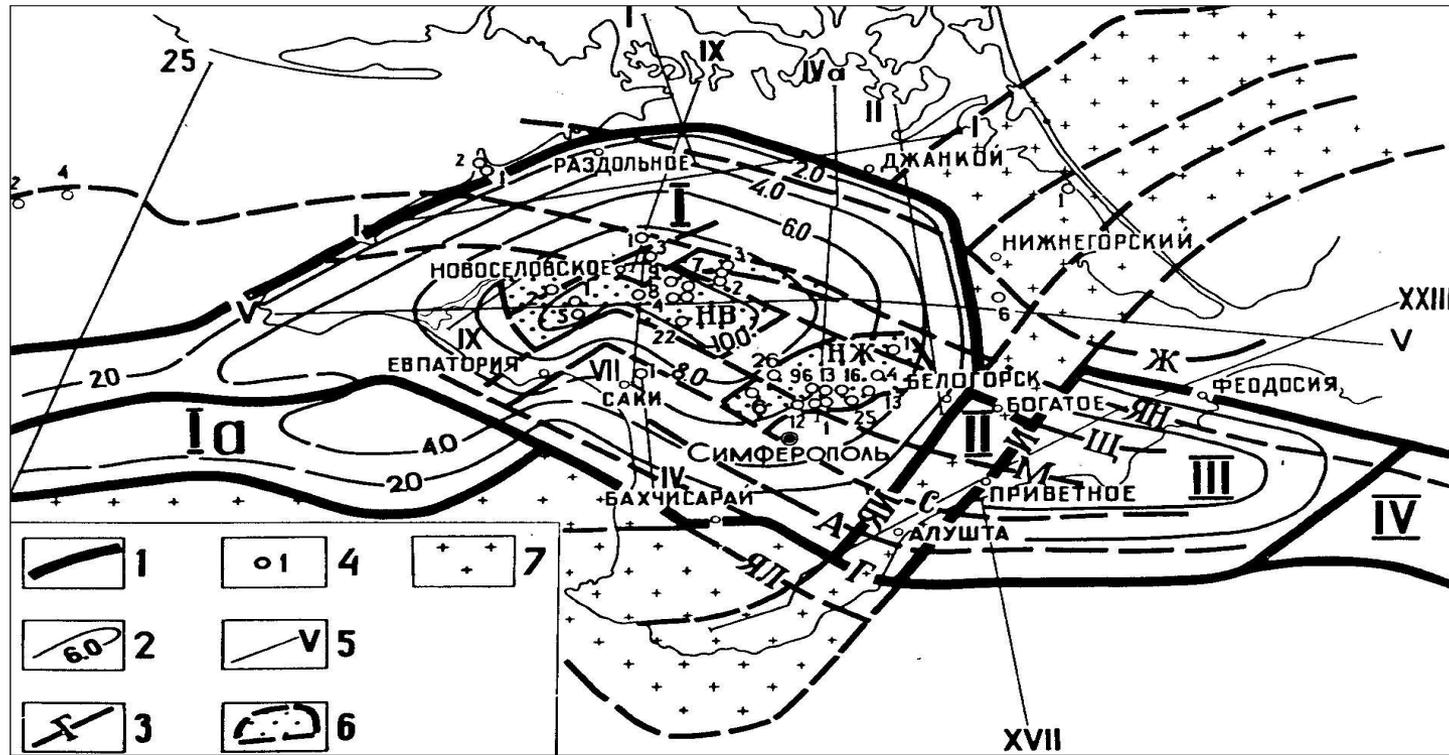
Пояснения: Изолинии – изогипсы поверхности надвига; кружки – скважины и их номера (в числителе – возраст пород в кровле надвига, в знаменателе – абсолютная отметка поверхности разрыва)

Схема строения байкальского структурного яруса



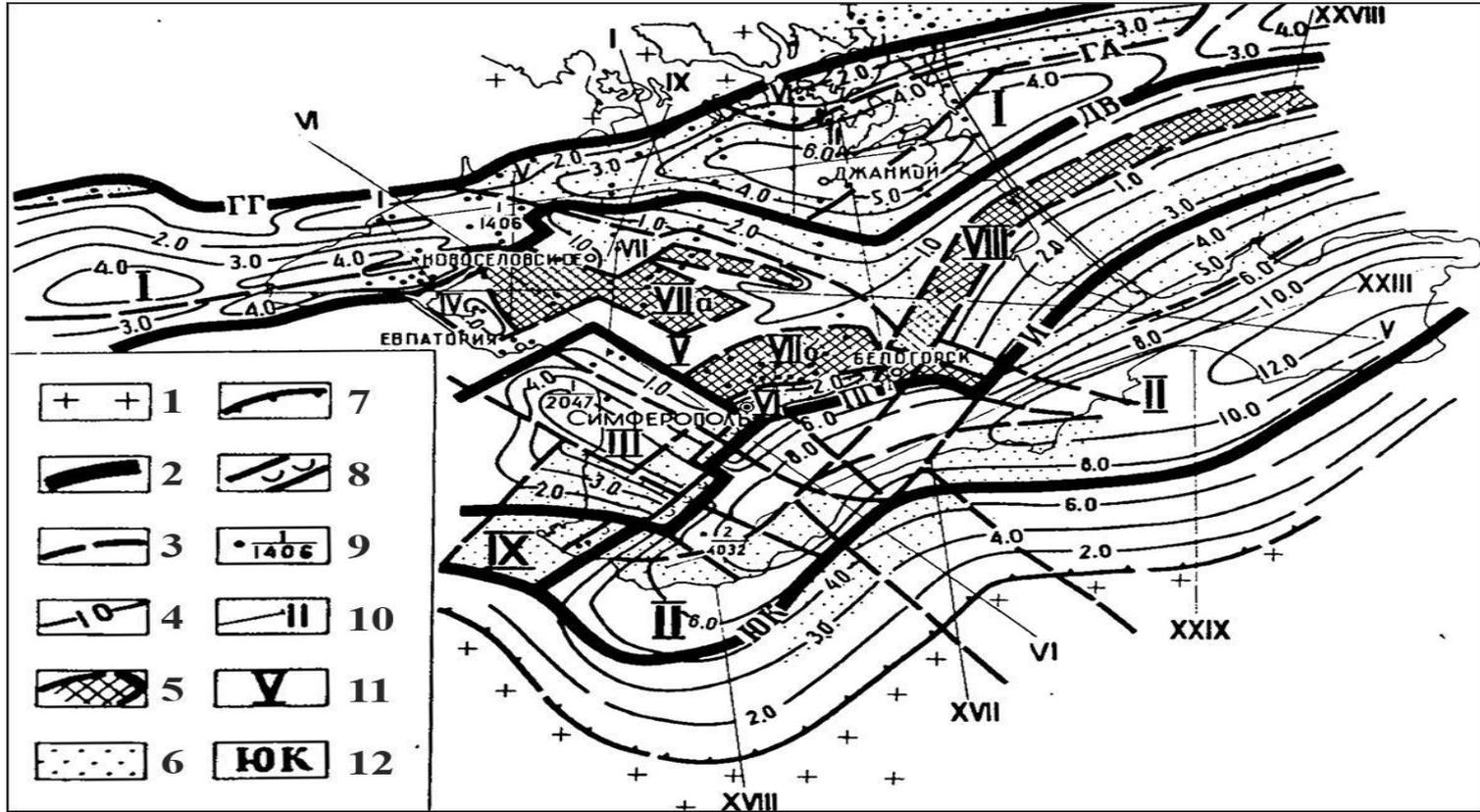
Условные обозначения: 1 – предполагаемая северная граница развития дальсландского структурного яруса; 2 – границы байкальского прогиба и его отдельных зон; 3 - основные межблоковые разломы байкальского заложения; 4 – изопакиты байкальского структурного яруса по геофизическим данным; 5 – профили ГСЗ и КМПВ; 6 – положительные и отрицательные остаточные аномалии силы тяжести; 7 – крупные гравитационные максимумы; 8 – интенсивные магнитные максимумы; 9 – скважины, вскрывшие докембрийские породы; 10 – эпицентры землетрясений высокой магнитуды. Межблоковые разломы: Д- Джанкойский, Г – Гвардейский, Б – Бахчисарайский, ЯЙ – Яйлинский, И - Индольский, Ч – Чурук-Сунский.

Схема строения герцинского структурного этажа



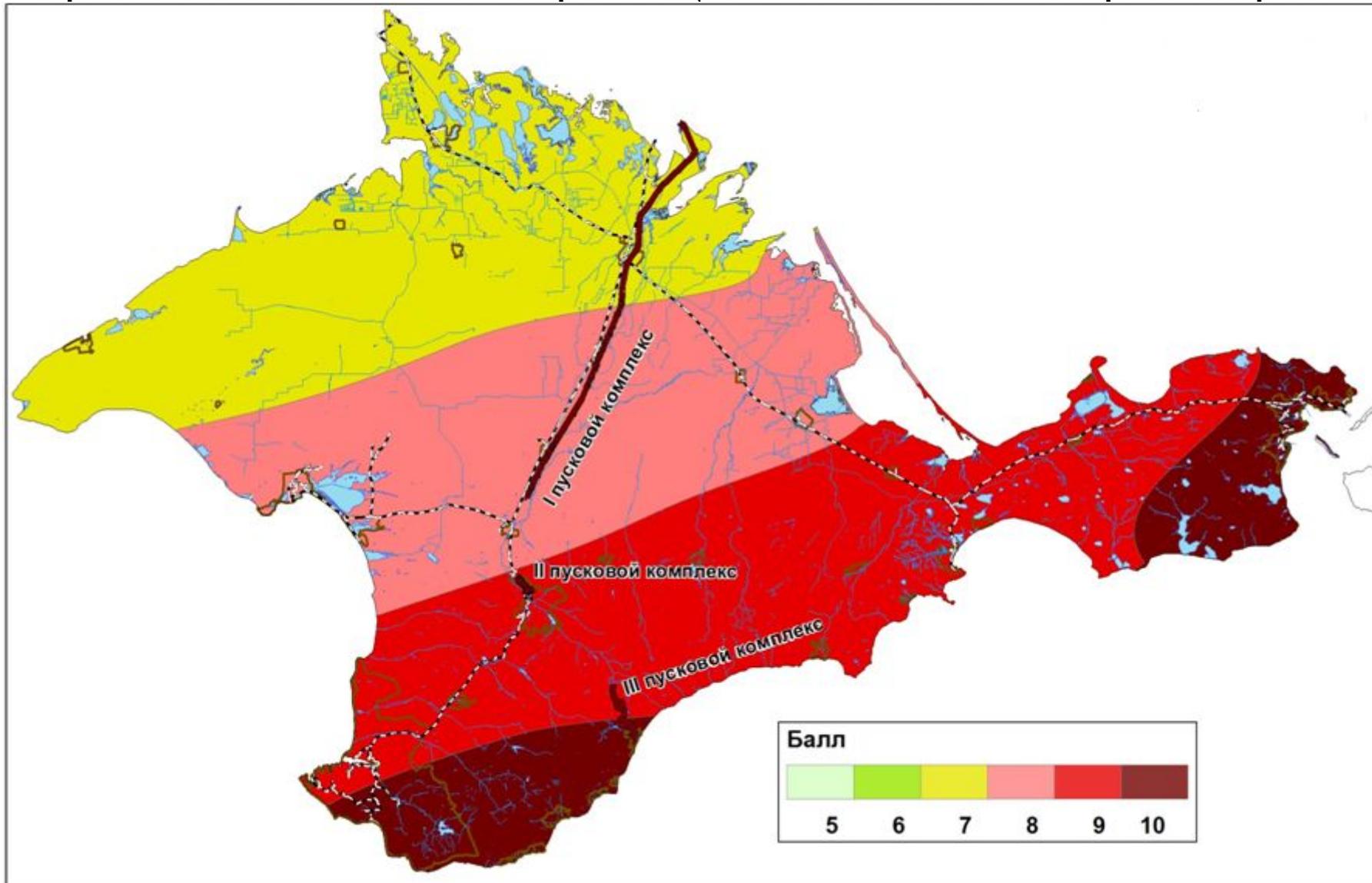
Условные обозначения: 1 – границы герцинской геосинклинали и ее отдельных зон: I – Центрально-Крымского прогиба, Ia – Каламитской зоны, II – Богатовской перемычки, III – Восточнокрымского прогиба, IV – Южнокерченской перемычки; 2 – линии равных мощностей отложений главного герцинского геосинклинального комплекса (в км); 3 – разломы: ЯЛ – Ялтинский, Г – Гурзуфский, А – Алуштинский, С – Симферопольский, М – Молбайский, Щ – Щebetовский, ЯН – Янышарский, Ж – Журавлевский, И – Индольский, ЯЙ – Яйлинский; 4 – скважины, вскрывшие доверхнепалеозойские породы; 5 – профили КМПВ и ГСЗ; 6 – выступы среднепалеозойских метаморфических сланцев под осадочным чехлом: НВ – Виноградовский, НЖ – Новожиловский; 7 – области распространения пород байкальского структурного яруса под верхнепалеозойскими и мезозойскими отложениями.

Схема строения нижнекиммерийского тектонического подэтажа



Условные обозначения: 1 – массивы доверхнепротерозойских пород; 2 – границы раннекиммерийских прогибов; 3 – разломы; 4 – изопакиты верхнепалеозойских-среднеюрских отложений по геофизическим данным; 5 – глыбовые массы палеозойских и докембрийских пород; 6 – участки развития тоар-среднеюрских отложений; 7 – южная граница выклинивания образований нижнекиммерийского тектонического подэтажа; 8 – горстообразные блоки фундамента по данным электроразведки; 9 - скважины, вскрывшие домеловые породы (в знаменателе – вскрытые мощности тоар-юрских отложений); 10 – профили КМПВ и ГСЗ; 11 – палеотектонические элементы: I – Тарханкутско-Березанский прогиб, II – Крымско-Кавказский прогиб, III – Николаевский прогиб, IV – Крыловский грабен, V – Гвардейский желоб, – Битакский прогиб, VIIa и VIIб – Виноградовский и Новожиловский выступы палеозойских сланцев, VIII – Белогорско-Азовский горст-антиклинорий; 12 – зоны краевых разломов: ГГ – Голицинско-Геническая, ДВ – Донузлавско-Валокская, И – Индольская, ПГ – Предгорнокрымская, ЮК – Южнокрымская.

Фрагмент комплекта карт общего сейсмического районирования



На рисунке изображен фрагмент карты ОСР 2004 года с 1%-ной вероятностью превышения расчетной интенсивности в течении 50 лет (период повторяемости 5000 лет)

Метод построения карт ОСР

В качестве основы вероятностных карт сейсмического районирования принимаются карты расчетной интенсивности (балльности) I со средней повторяемостью в данной точке за T лет. Повторяемость T означает, что вероятность P возникновения и возможного превышения этой величины в течении t лет (т.е. произойдет хотя бы одно такое событие) равна:

$$P=1-\exp(-t/T)$$

При соотношении $t \ll T$ вероятность $P=t/T$. При $T=500$ и $t=50$ лет P составит 10%, при $T=1000$ лет и $t=50$ лет $P=5\%$ и т.д.

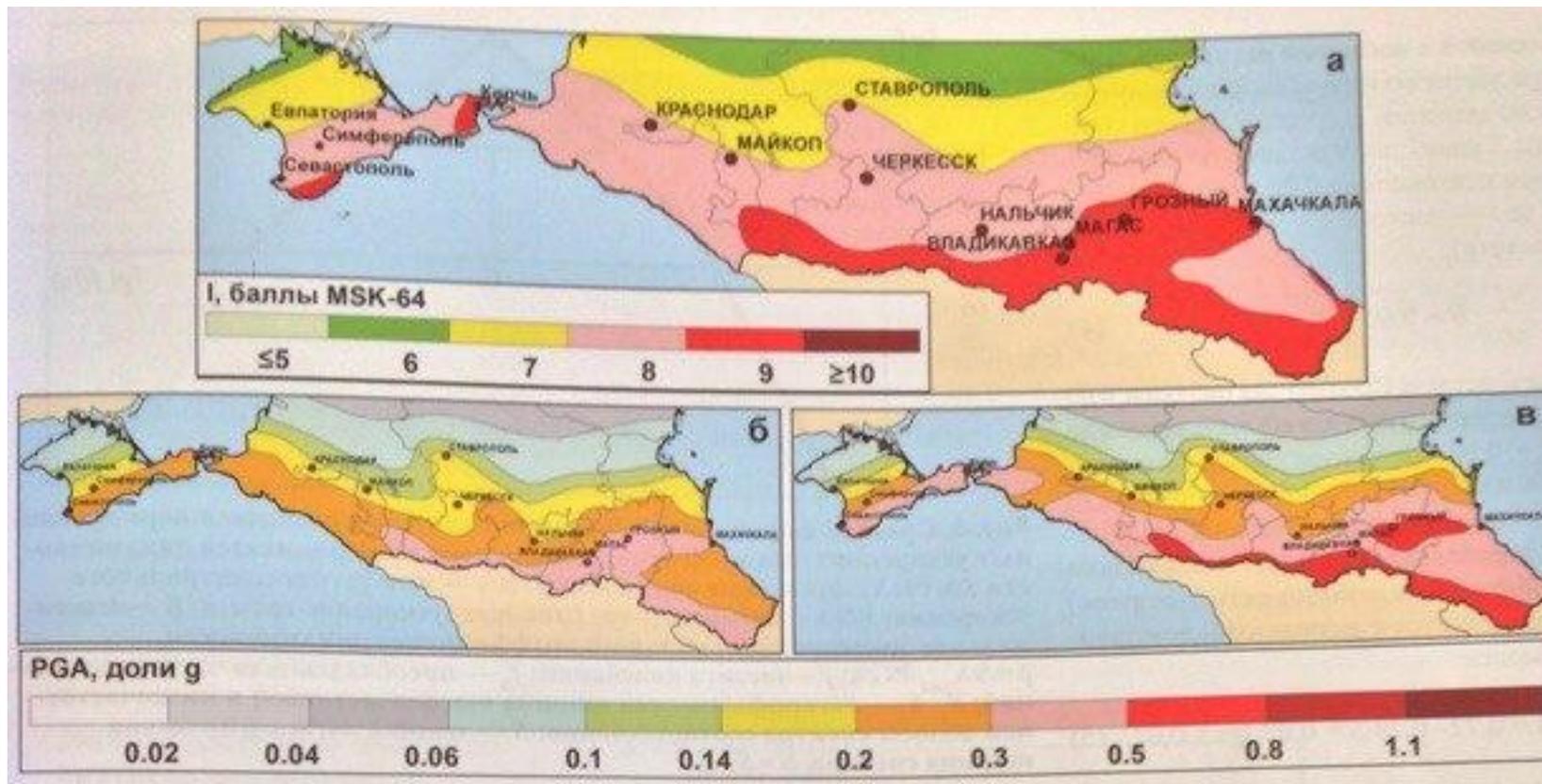
Комплекс карт ОСР включает 3 карты, отражающие вероятности 10%, 5%, 1%

Уточнение сейсмической опасности

- **Уточнение сейсмической опасности (УСО)** выполняется с целью получения более детальной информации о сейсмичности отдельных территорий. Прежде всего уточняются каталог землетрясений и другие геолого-геофизические базы данных, затем - ЛДФ-модель зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ), модель сейсмического эффекта, включая затухание его с расстоянием. Затем проводится вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) и соответствующее картирование

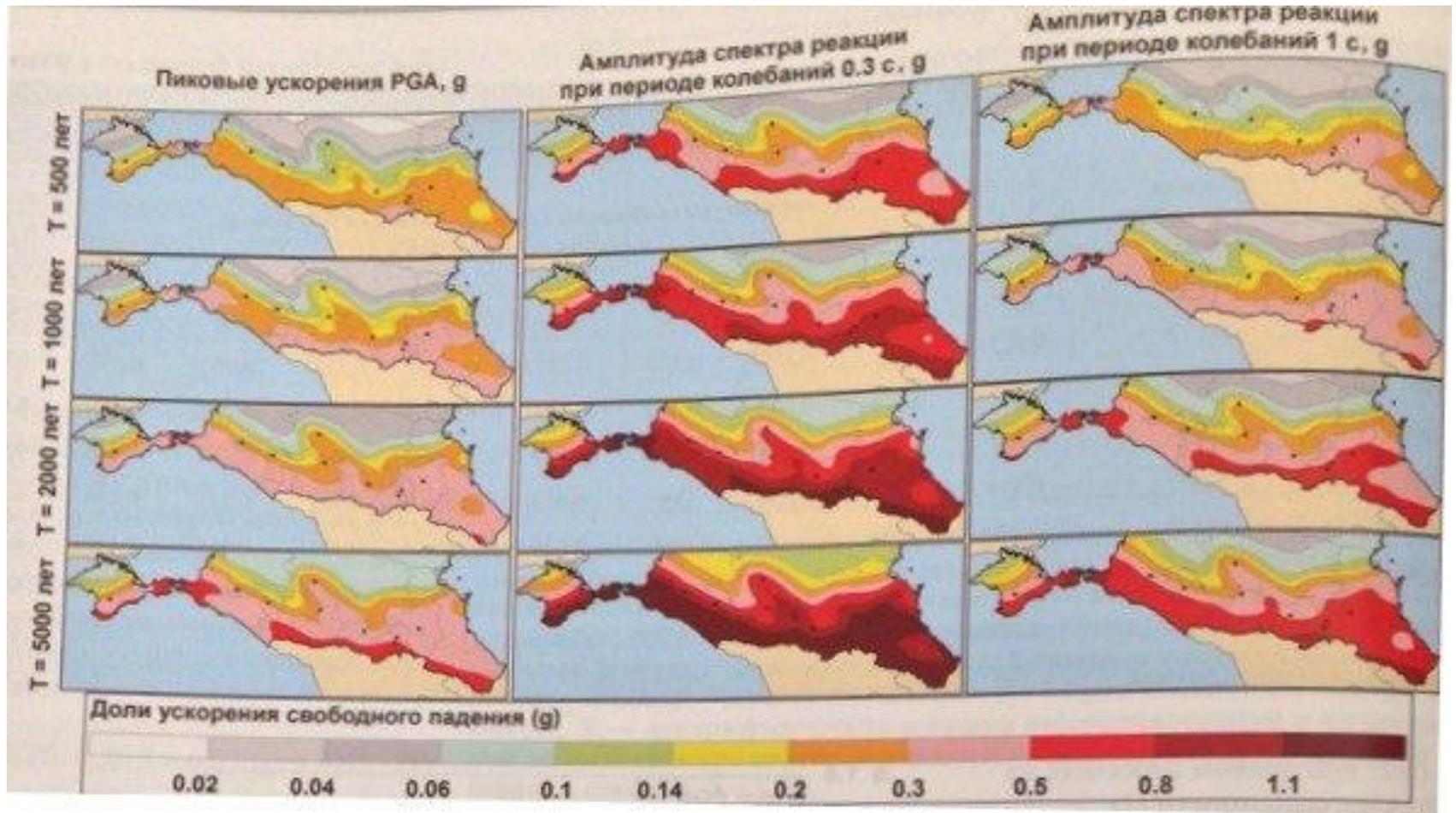


Результаты перерасчета фрагмента карты ОСР-2016-В из I в PGA



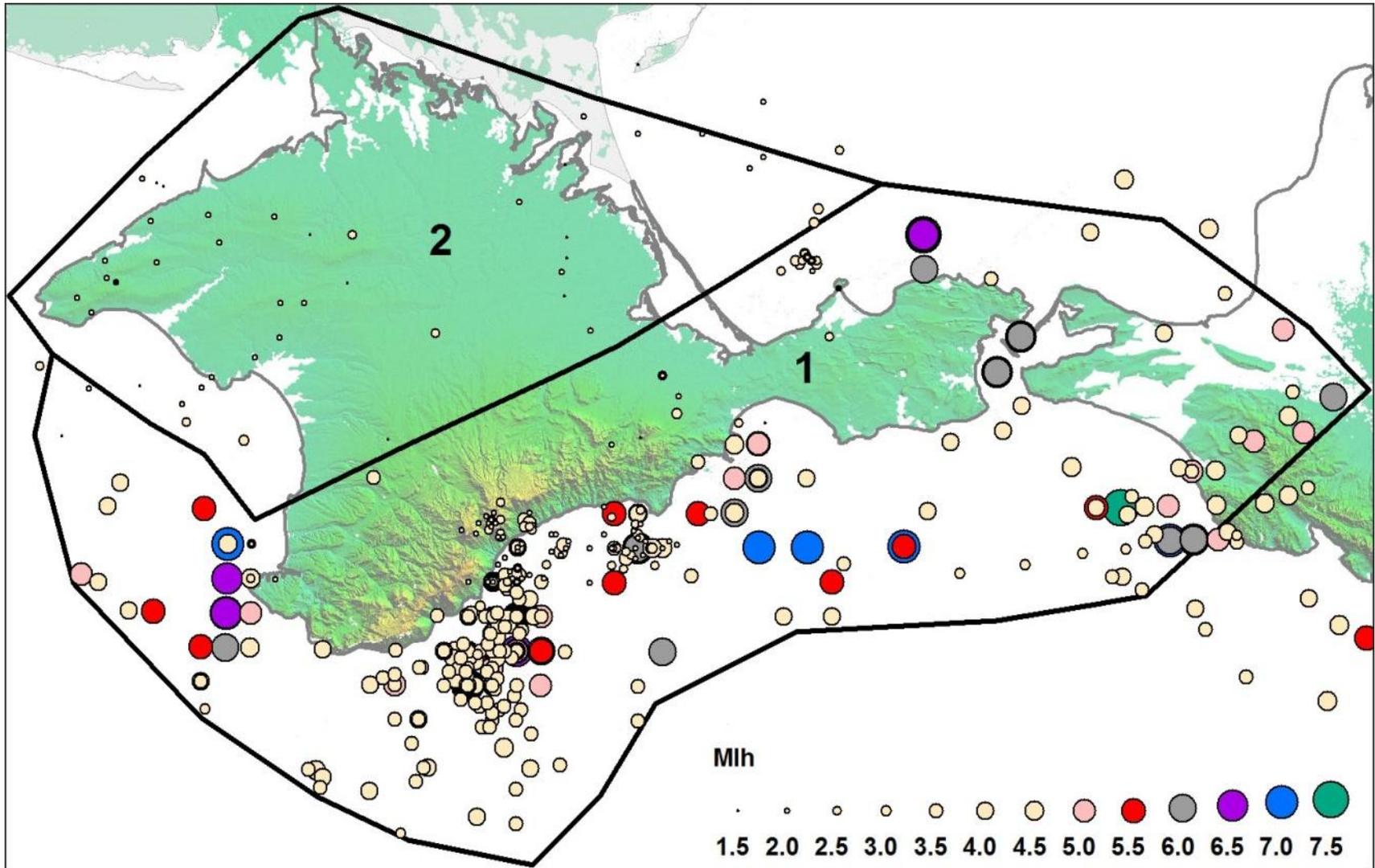
Фрагмент карты ОСР-2016-В (5% вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет, период повторяемости 1000 лет) для территории Северного Кавказа (а) и результаты его перерасчета из интенсивности I в баллах в пиковое ускорение PGA по зависимости МСК-64 (б) и Ф.Ф. Аптикаева (в) (g- ускорение свободного падения)

Результаты моделирования сейсмической опасности территории Крыма и Северного Кавказа



Моделирование проводилось для разных периодов повторяемости T в амплитудных параметрах с использованием эмпирических моделей затухания

Оценка сейсмического режима исследуемой территории

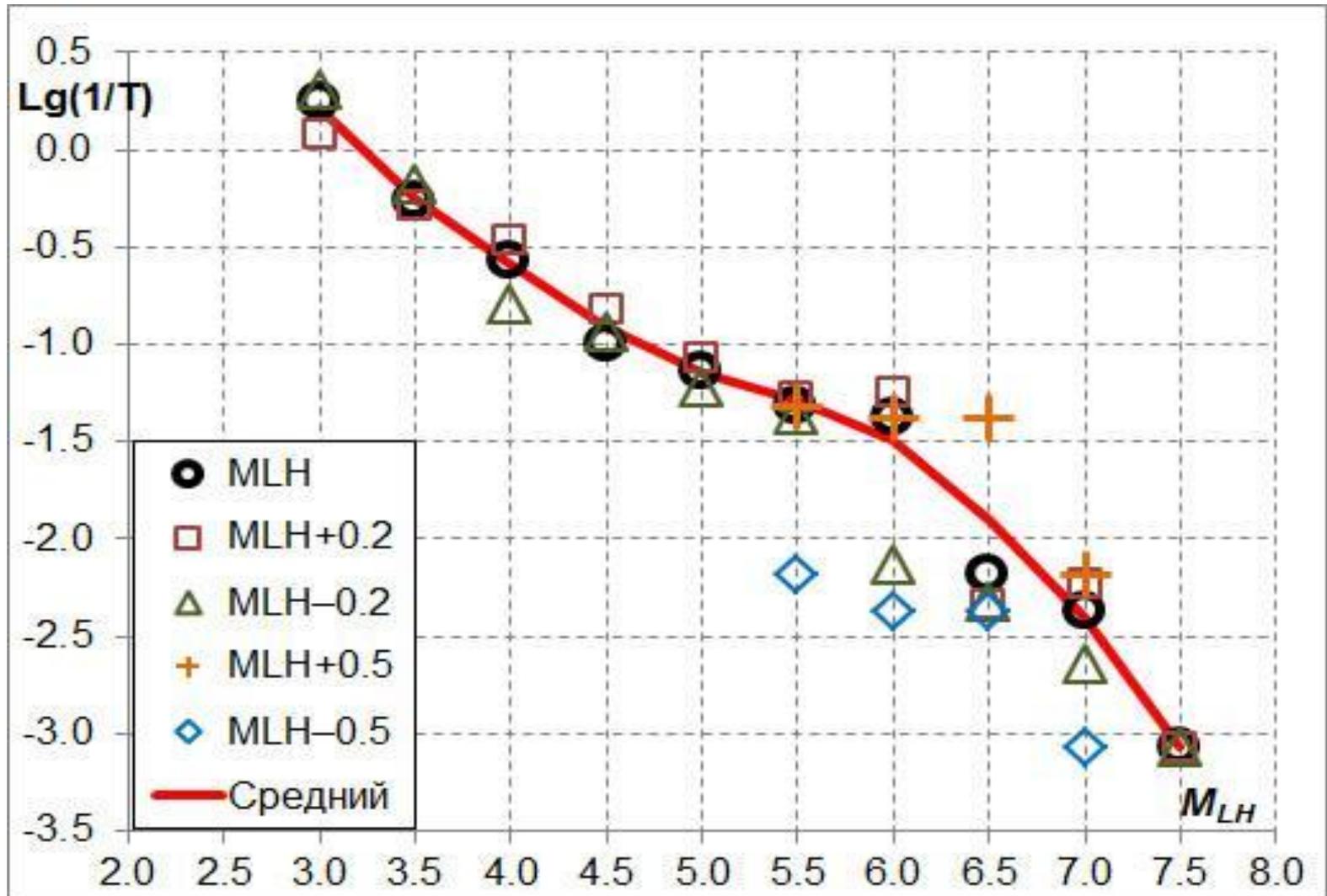


Регионы построения графиков повторяемости и эпицентры землетрясений

Регион 1. Горный Крым, Керчинский полуостров, Таманский полуостров;

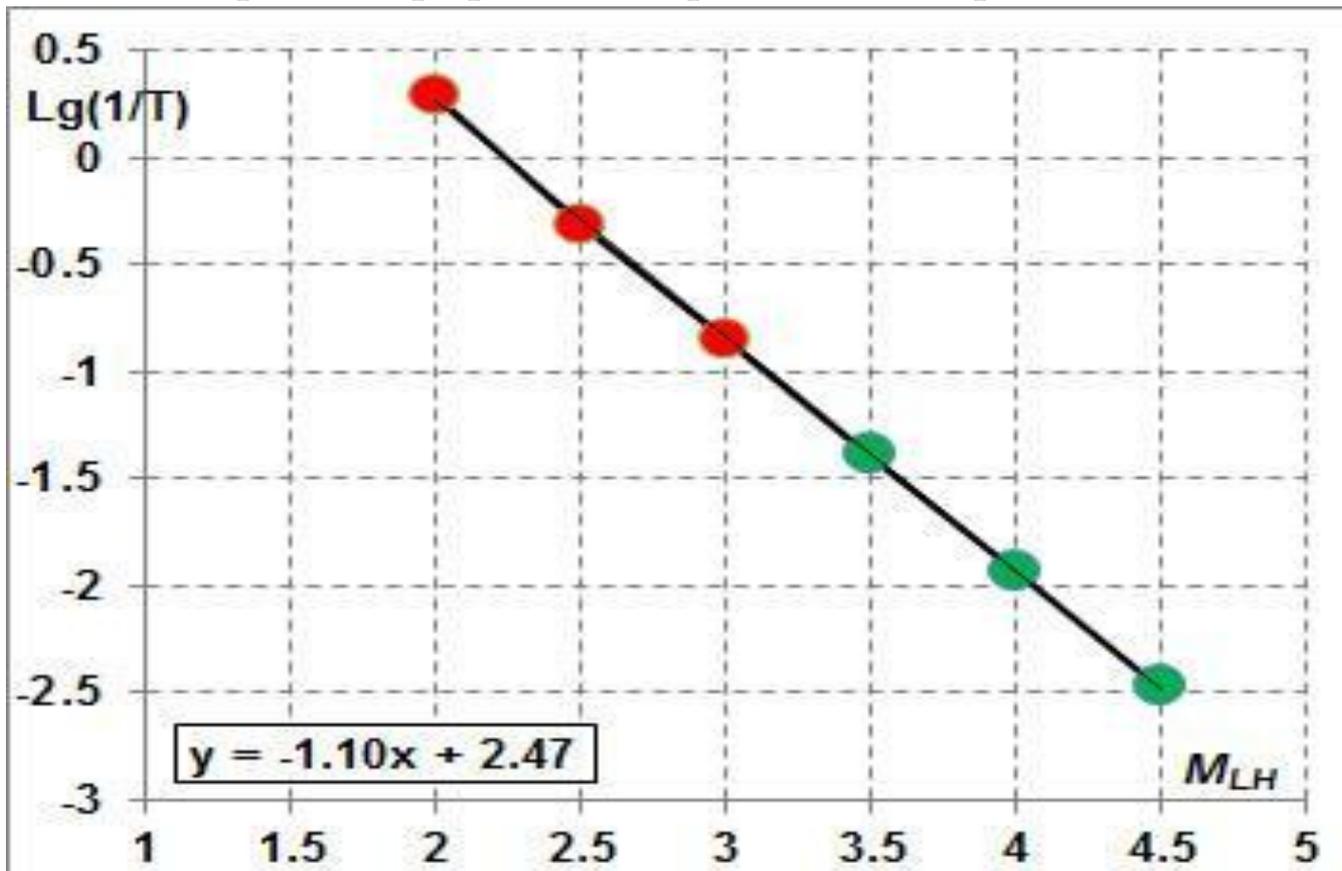
Регион 2. Равнинный Крым.

Построение графика повторяемости для региона 1



На рисунке показано сопоставление графиков повторяемости землетрясений в интервале магнитуд 5.5 – 7.0, полученных по данным каталогов №1 и №2. Данный интервал магнитуд на стадии УСО будет отнесен к линеamentным структурам модели зон ВОЗ.

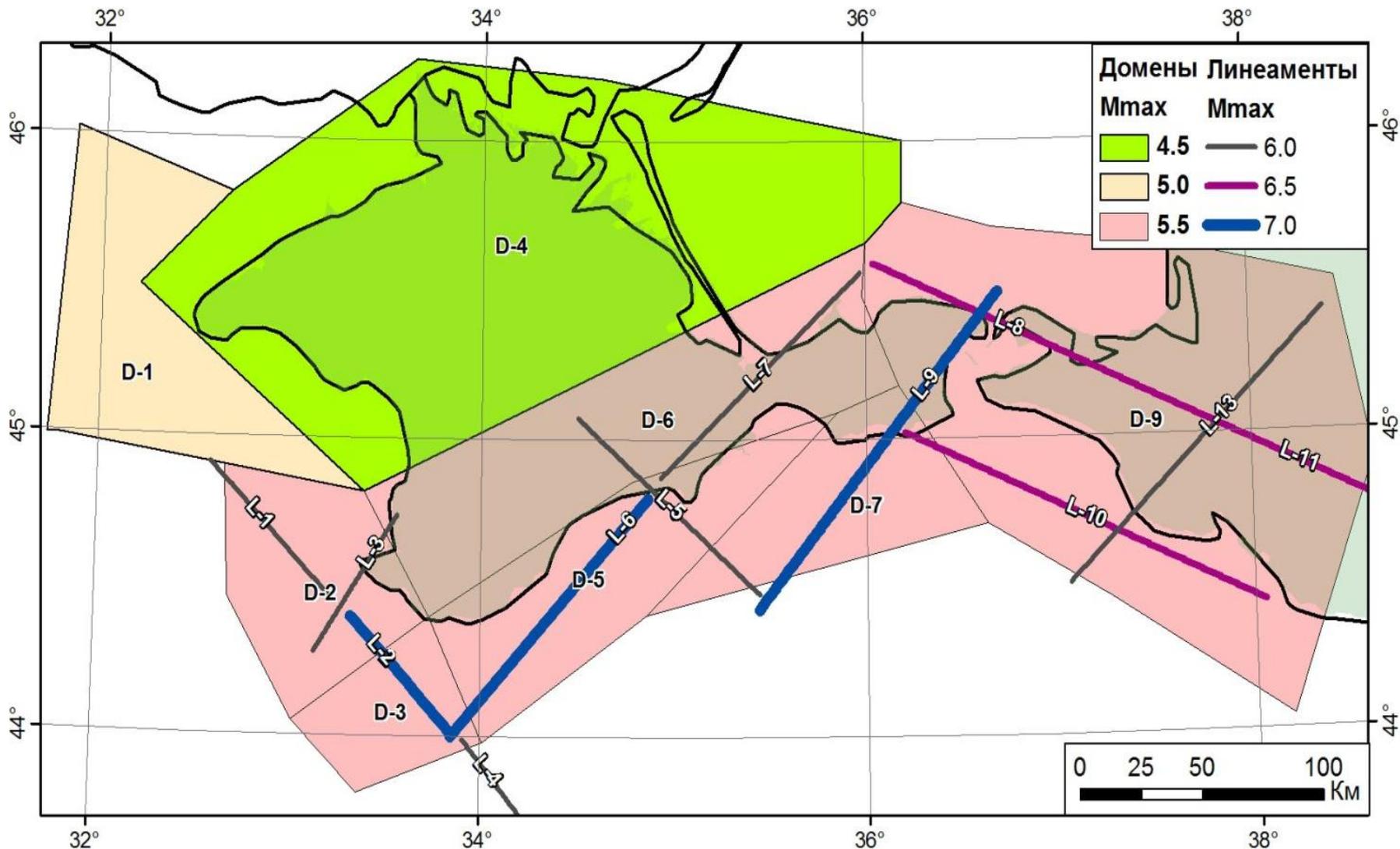
Построение графика повторяемости для региона 2



Для региона 2 построить статистически достоверный график повторяемости, по имеющимся данным, довольно сложно. По аналогии с регионом 1 получены средние оценки повторяемости землетрясений $M_{lh}=2.0\pm 0.2$, с учетом вероятных погрешностей. Средний период повторяемости составил ~ 0.5 лет.

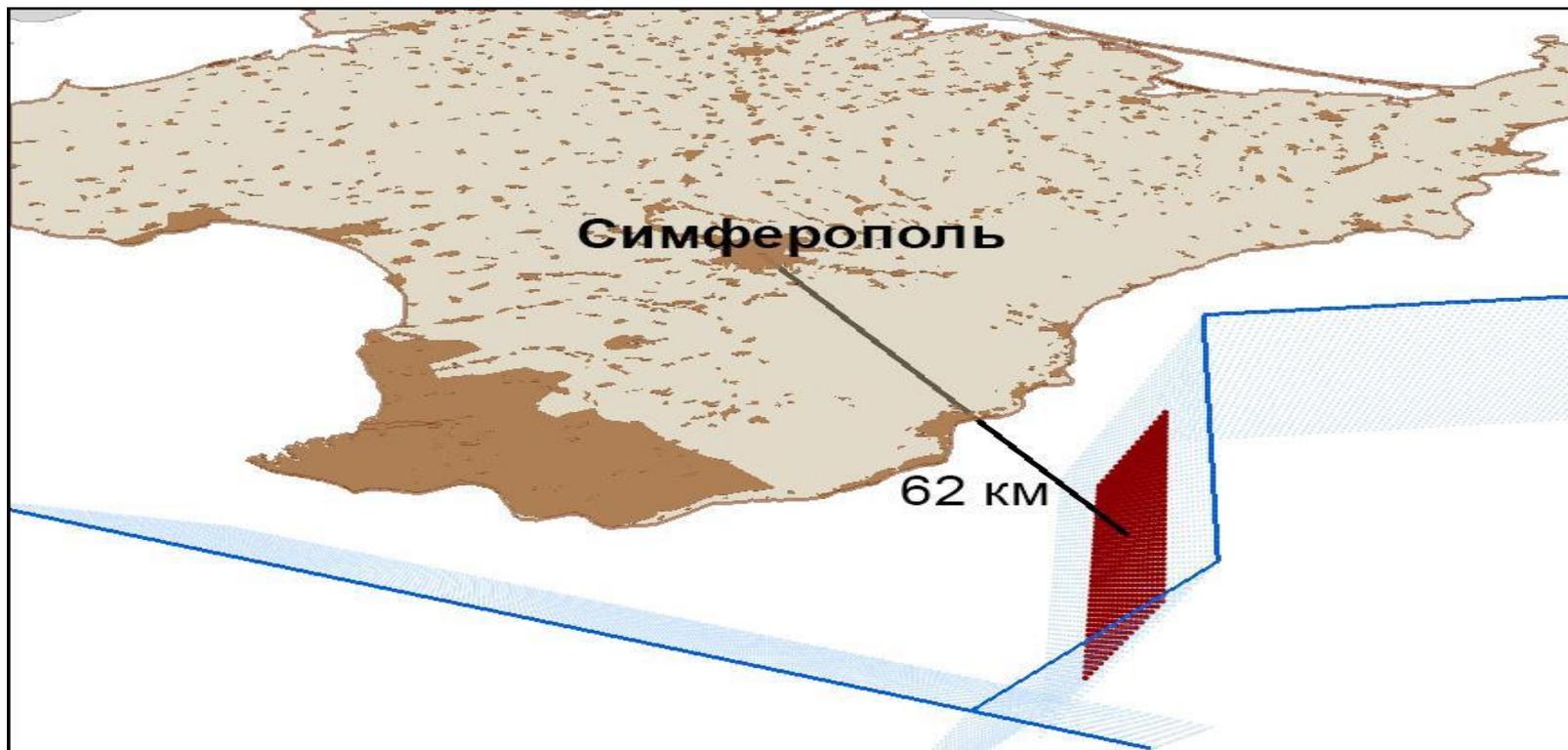
Минимальные оценки периодов повторяемости T для землетрясений с магнитудой $M_{LH}=2.5\pm 0.2$ и $M_{LH}=3.0\pm 0.2$ составили 2 и 7 лет соответственно. Для землетрясений с магнитудой более 3.0 на территории равнинного Крыма статистика отсутствует.

Модель зон ВОЗ ОСР-2016 территории Крыма



В 2013-2015 гг. выполнены работы по разработке комплекта карт ОСР-2016, в рамках которых была актуализирована модель зон ВОЗ территории Крыма

Корректировка модели сейсмического эффекта

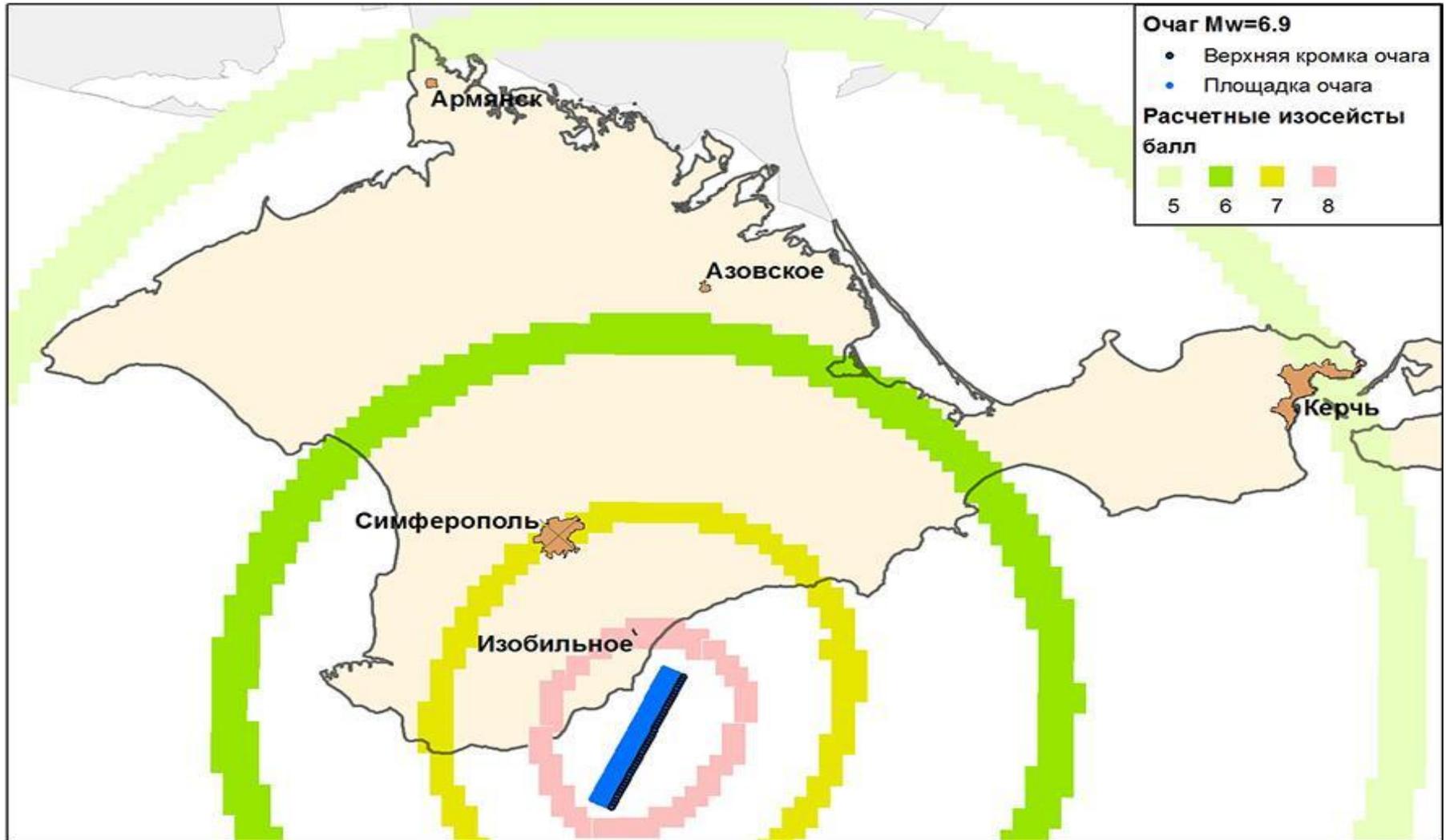


В качестве базовых параметров модели затухания подобраны следующие коэффициенты (табл). Для удобства будем далее называть скорректированную модель затухания – модель затухания УИС.

Таблица. Параметры модели затухания.

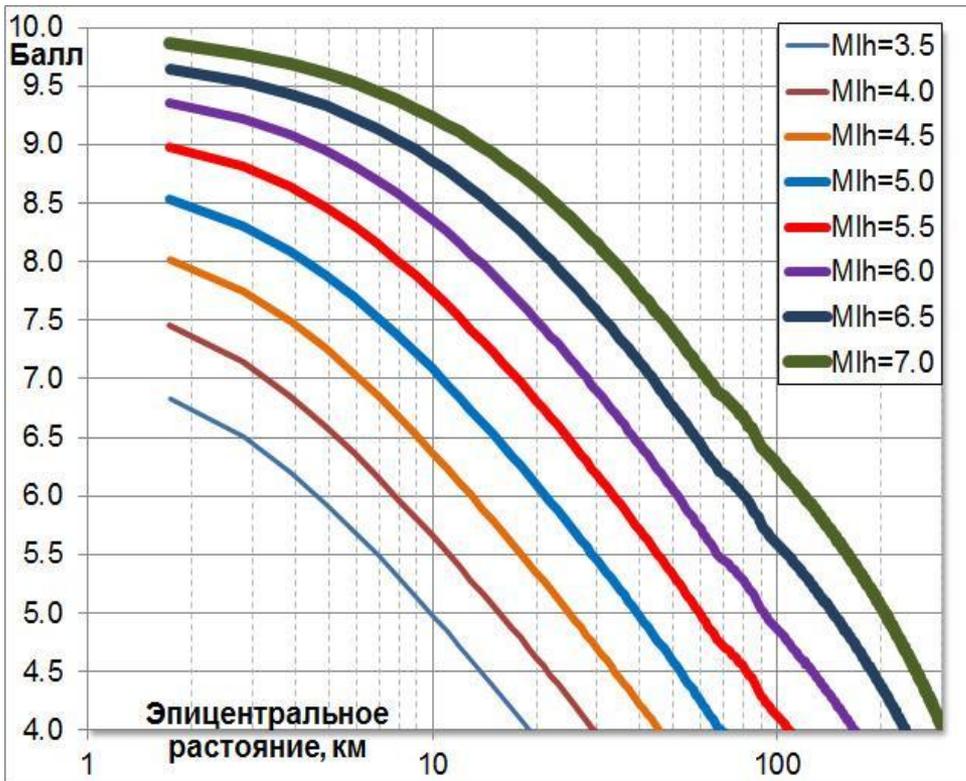
C_A	C_M	C_{MS}	n_1	r_{Q1}	r_C	n_2	r_{Q2}	M_{wb}	r_b	I_b
1.667	1.72	4.1	1	80	70	0.5	100	6.9	57	7

Расчетные изосейсты землетрясения $M_{wb}=6.9$

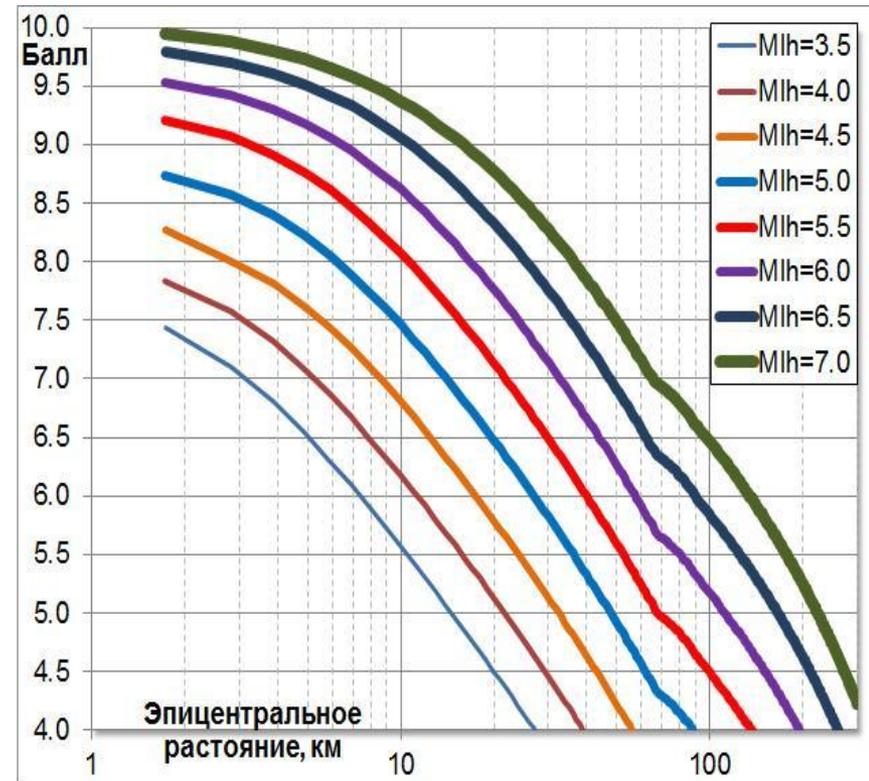


На рисунке показаны расчетные изосейсты от модельного землетрясения 11.09.1927 ($M_w=6.9$). Глубина верхней кромки очага 10 км, глубина центра площадки 17 км. длина площадки очага 41 км, ширина площадки очага 15 км. Изосейсты соответствуют расчетным значениям интенсивности 5 ± 0.05 , 6 ± 0.05 , 7 ± 0.05 , 8 ± 0.05 балла.

Кривые спада балльности по двум моделям затухания



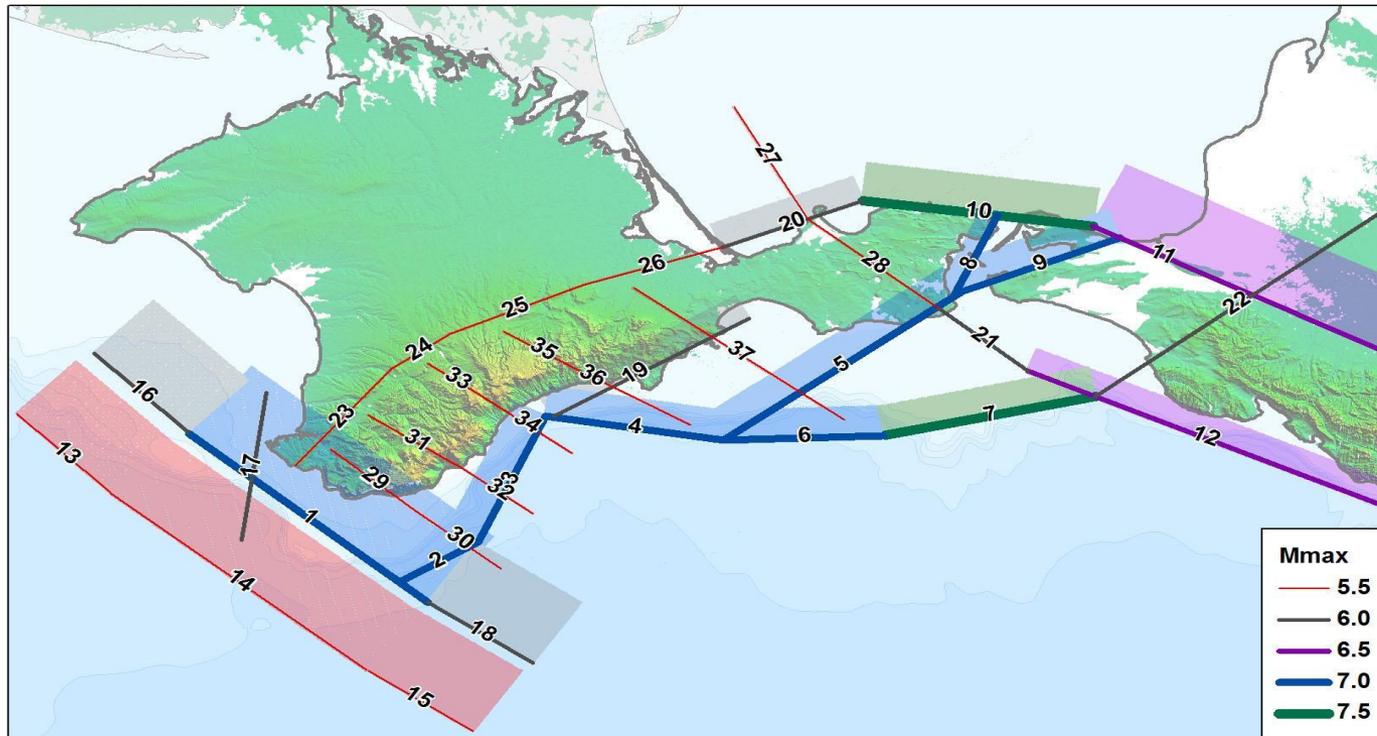
Модель затухания
ОСР-97



Модель затухания
УИС

Из рисунка видно, что построенная по ним модель затухания УИС дает оценки интенсивности от землетрясений в интервале магнитуд M_{LH} 6.0 – 7.0 на $\sim 0.2-0.3$ балла выше, чем по модели затухания ОСР-97. Это объясняется меньшей добротностью среды в целом для Кавказского региона и выражено через понижение коэффициента r_{Q1} .

Линеаменты модели зон ВОЗ



Для каждого линеамента, в качестве повторяемости землетрясений с заданной магнитудой, принимается произведение длины линеамента на региональную повторяемость, нормированную на суммарную длину линеаментов региона, способных сгенерировать рассматриваемую магнитуду:

$$V_i(M) = L_i * V_{reg}(M) / \Sigma(L_{M_{max} \geq M}),$$

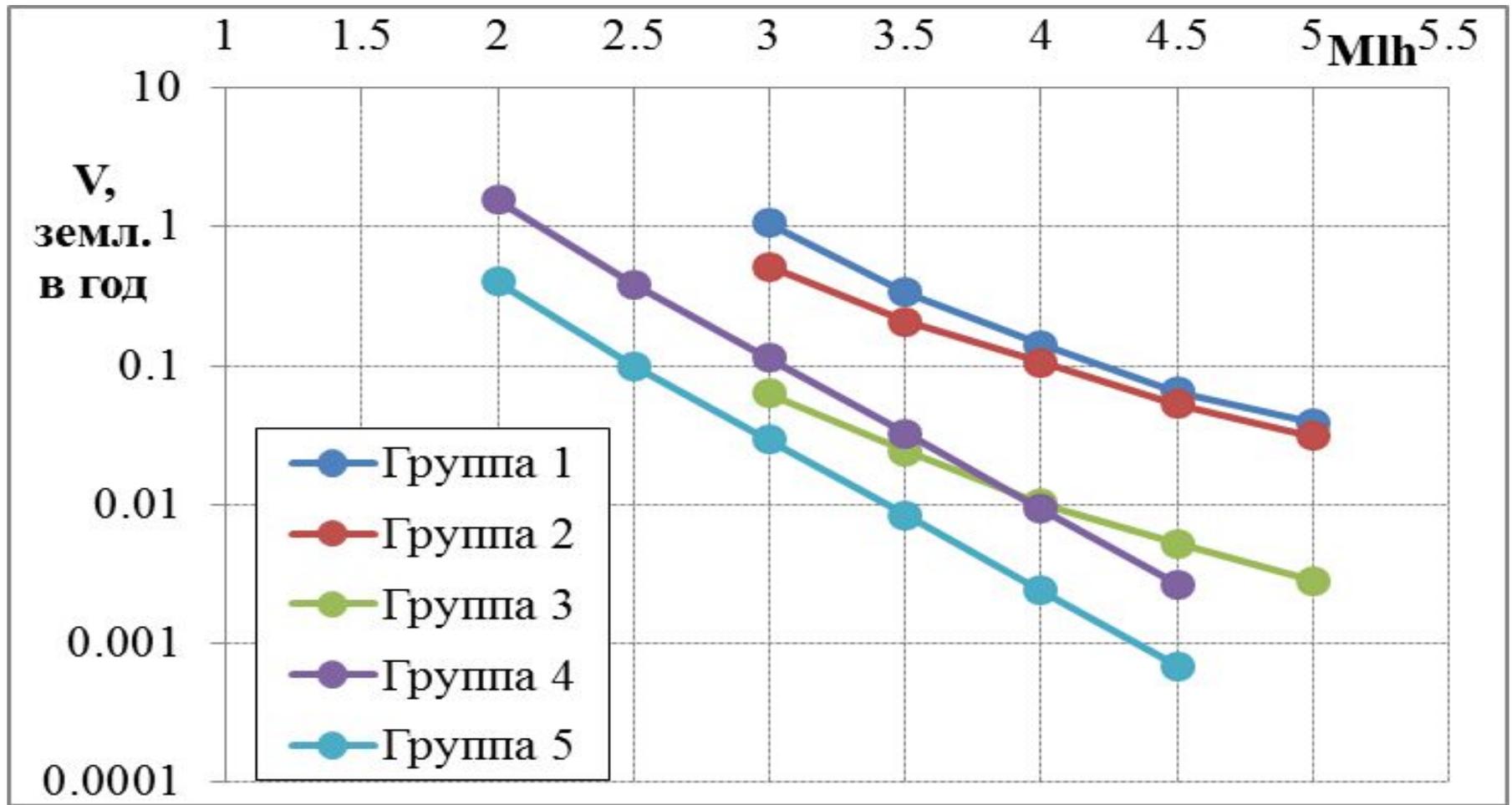
где $V_i(M)$ - повторяемости на i -том линеаменте землетрясений с магнитудой M , L_i - длина i -того линеамента, $V_{reg}(M)$ - повторяемость землетрясений с магнитудой M в регионе, $\Sigma(L_{M_{max} \geq M})$ - сумма длин линеаментов с M_{max} большей или равной магнитуде M .

Для уверенной индивидуальной параметризации доменов статистических данных недостаточно. Домены были разделены на пять групп, в соответствии с уровнем сейсмической активности:

1. № 1, 3, 4, 5, 6 (регион 1);
2. № 2, 7, 8, 11 (регион 1);
3. № 9, 10 (регион 1);
4. № 13, 15, 17, 18, 20 (регион 2);
5. № 12, 14, 16, 19, 21 (регион 2).

В качестве критерия сейсмической активности принималась удельная (на единицу площади) повторяемость землетрясений опорных магнитуд. В качестве опорных магнитуд выбирались те, по которым статистические данные наиболее полно представлены в соответствующем регионе. Для региона 1 была принята опорная магнитуда $M_{lh}=4.0\pm 0.2$, для региона 2 – $M_{lh}=2.0\pm 0.2$.

Графики повторяемости землетрясений для групп доменов

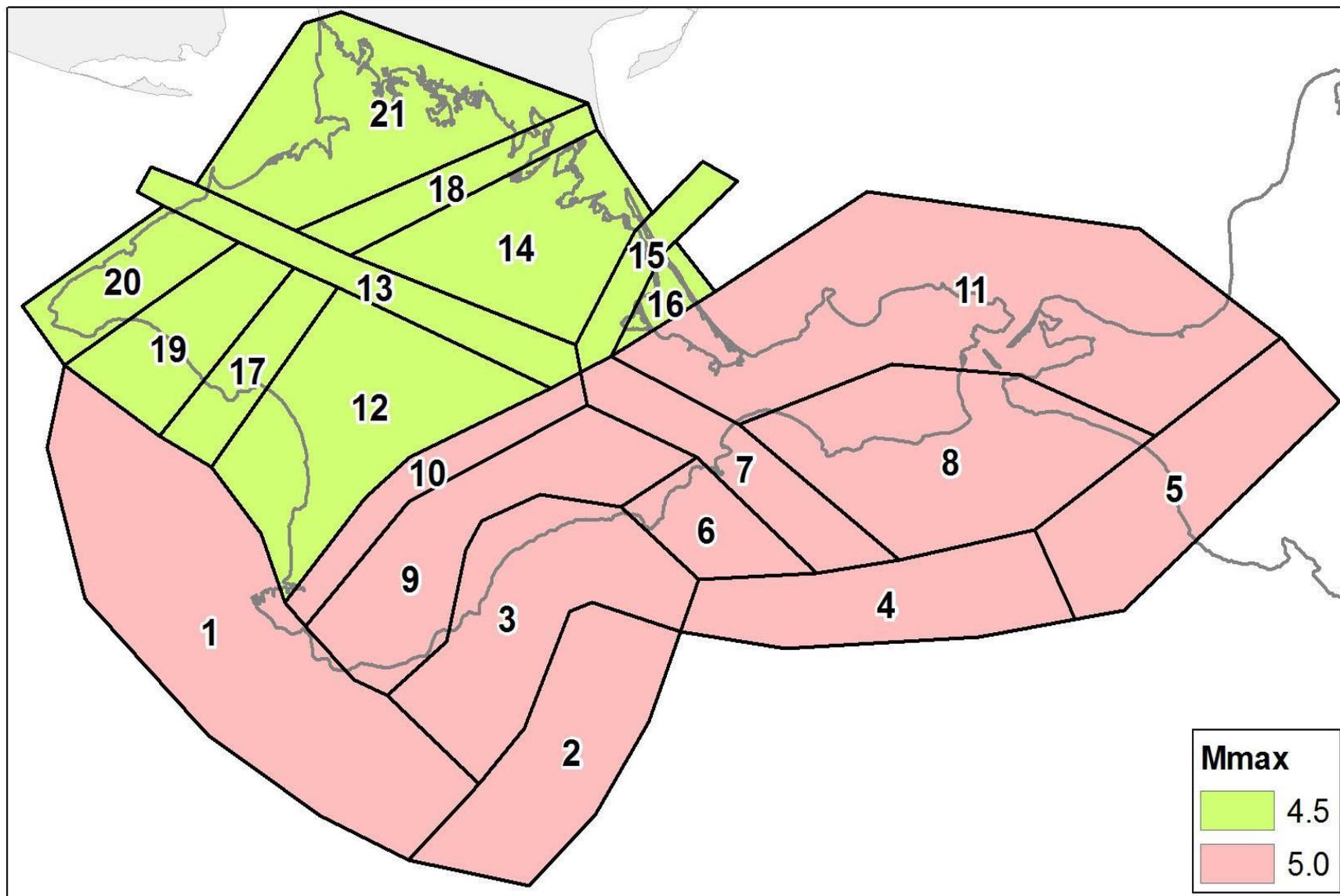


Полученные графики были распределены между доменов по формуле:

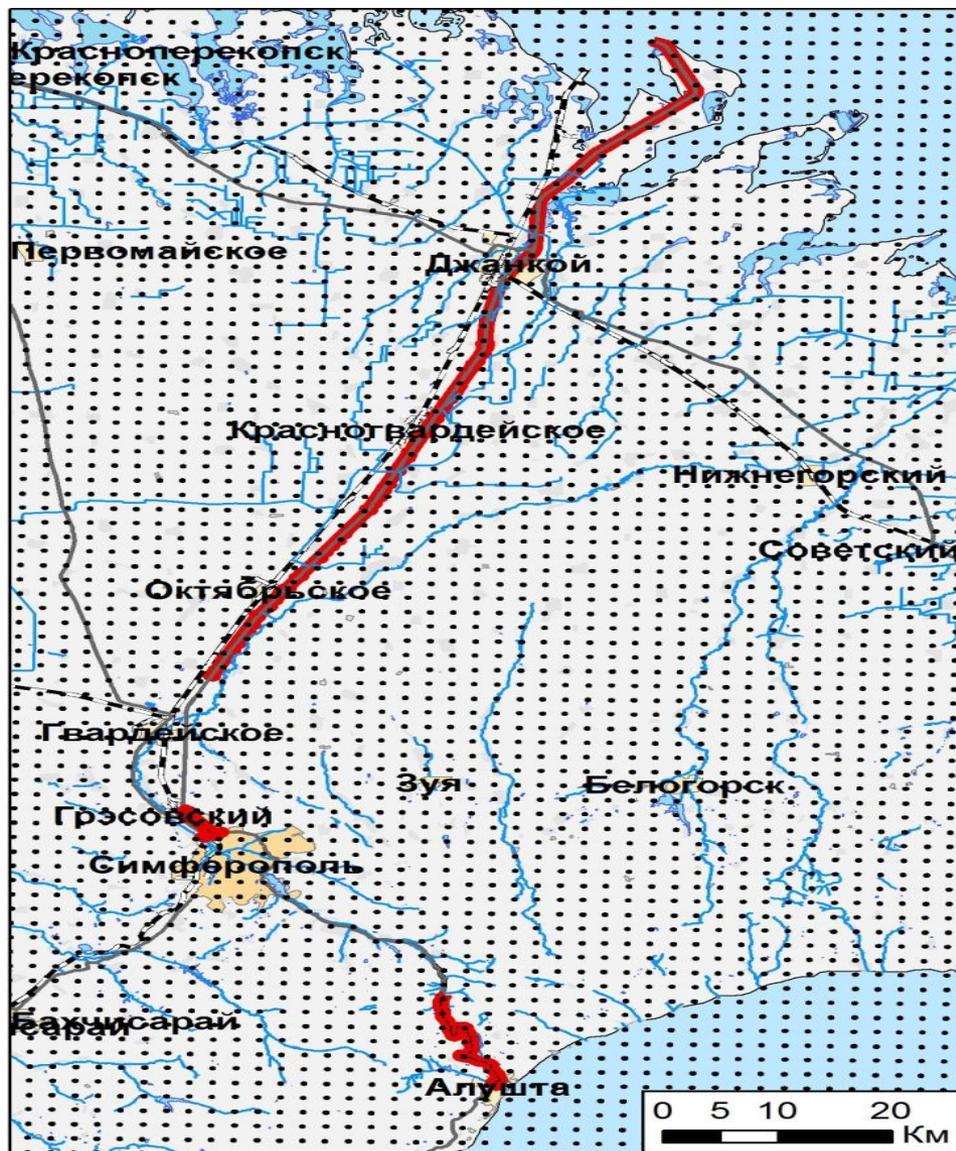
$$V_i(Mlh) = S_i * V_{\Sigma}(Mlh) / \Sigma(S_{M_{max} \geq Mlh}),$$

где $V_i(Mlh)$ - повторяемости в i -том домене землетрясений с магнитудой Mlh , S_i - площадь i -того домена, $V_{\Sigma}(Mlh)$ - повторяемость землетрясений с магнитудой Mlh в графике повторяемости группы доменов, $\Sigma(S_{M_{max} \geq Mlh})$ - сумма площадей доменов с M_{max} большей или равной магнитуде Mlh относящиеся к группе.

Доменная структура



Площадной расчет на базе ПМО ВАСО сейсмической опасности в долях балла (в привязке к средним грунтовым условиям)



Расчетная сетка с шагом 2×2 км

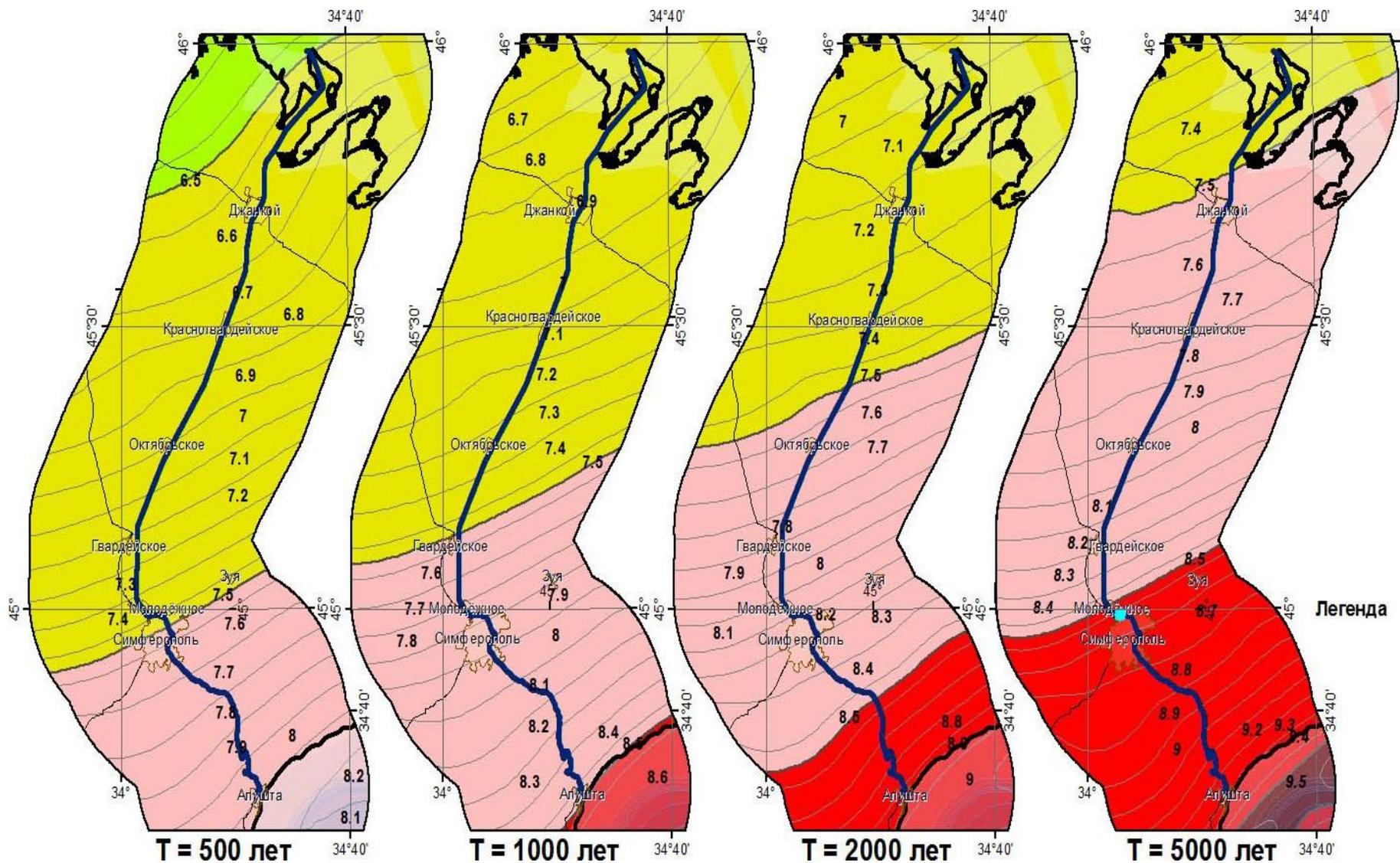
Пояснения

На заключительной стадии работ по оценке сейсмической опасности интенсивность сотрясений земной поверхности вычисляется от каждого виртуального очага в отдельности с учетом его размера и закона затухания сейсмических сотрясений с расстоянием. Расчеты производятся для каждого узла квадратной сетки.

Опрашивая каждый из виртуальных очагов и учитывая затухание сейсмического эффекта с расстоянием, для каждого узла сетки создается гистограмма, нормированная на заданное время T , частоты N проявления той или иной сейсмической интенсивности I . Гистограммы являются основой для расчетов и последующего картирования периодов повторяемости сейсмических воздействий разной балльности и сейсмической опасности. Повторяемость балла I за T лет - число землетрясений, вызывающих сотрясения с баллом $=I$. Повторяемость в среднем 1 раз за T лет означает, что вероятность превышения балла IT в течение t лет (т.е. произойдет хотя бы одно такое событие) равна $p=1-\exp(-t/T)$ и при $t \ll T$ - $p = t/T$. Например, при $T=1000$ лет и $t=50$ лет $p=5\%$ (точное значение - 4,88), при $T=2000$ лет и $t=50$ лет $p=2,5\%$ (точное значение - 2,47). Для заданных значений периодов повторяемости, рассчитаны соответствующие карты сейсмического районирования рассматриваемой территории.

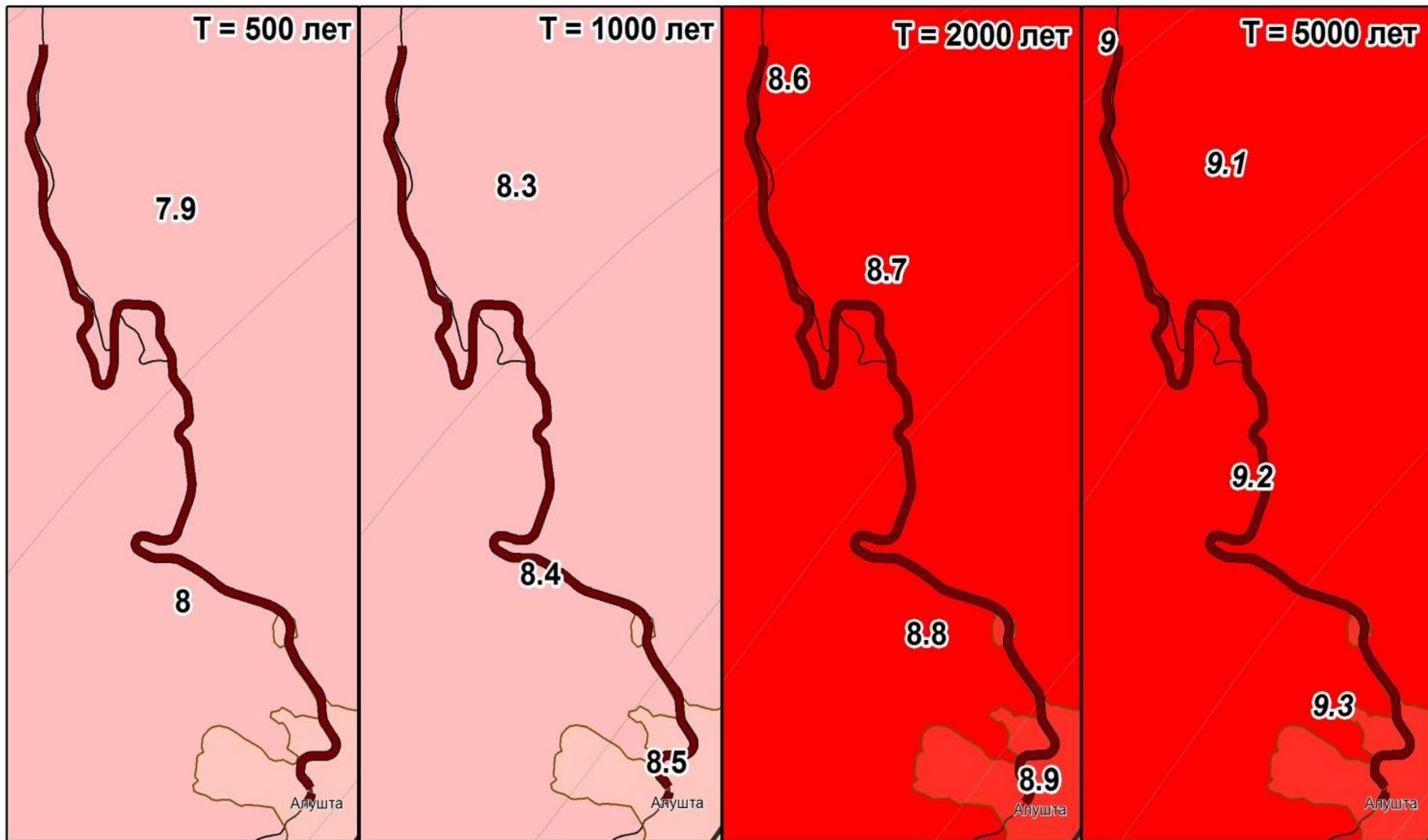
В результате расчетов получены таблицы, содержащие координаты узлов и расчетные значения интенсивности в них.

Схемы уточнения сейсмической опасности



Цветом показаны целочисленные оценки баллов, цифрами показаны расчетные значения дробных баллов для каждого узла сетки.

Схемы уточнения сейсмической опасности участка третьего пускового комплекса



Результаты уточнения сейсмической опасности непосредственно участка третьего пускового комплекса приведены на рисунке

Заключение

При выполнении работы были решены три основные взаимосвязанные задачи:

Изучение геодинамики региона, включающее исследование протяженного объекта

Уточнение коэффициентов расчетных геомodelей для оценки скоростей распространения сейсмических волн в геосреде включающие геодинамические исследования территории

Уточнение карт ОСР для протяженного объекта

Так же была разработана схема перехода от балльности к ускорению.

В ходе работ выполнена оценка сейсмического режима района, включающего 100-километровую зону вокруг площадки.

Уточнение сейсмической опасности площадок выполнено методом вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) на основе методики ОСР-97 (Институт Физики Земли РАН; профессор, д.ф.-м.н. В.И. Уломов)

По результатам уточнения сейсмической опасности получены оценки интенсивности сотрясений в привязке к грунтам второй категории по сейсмическим свойствам

