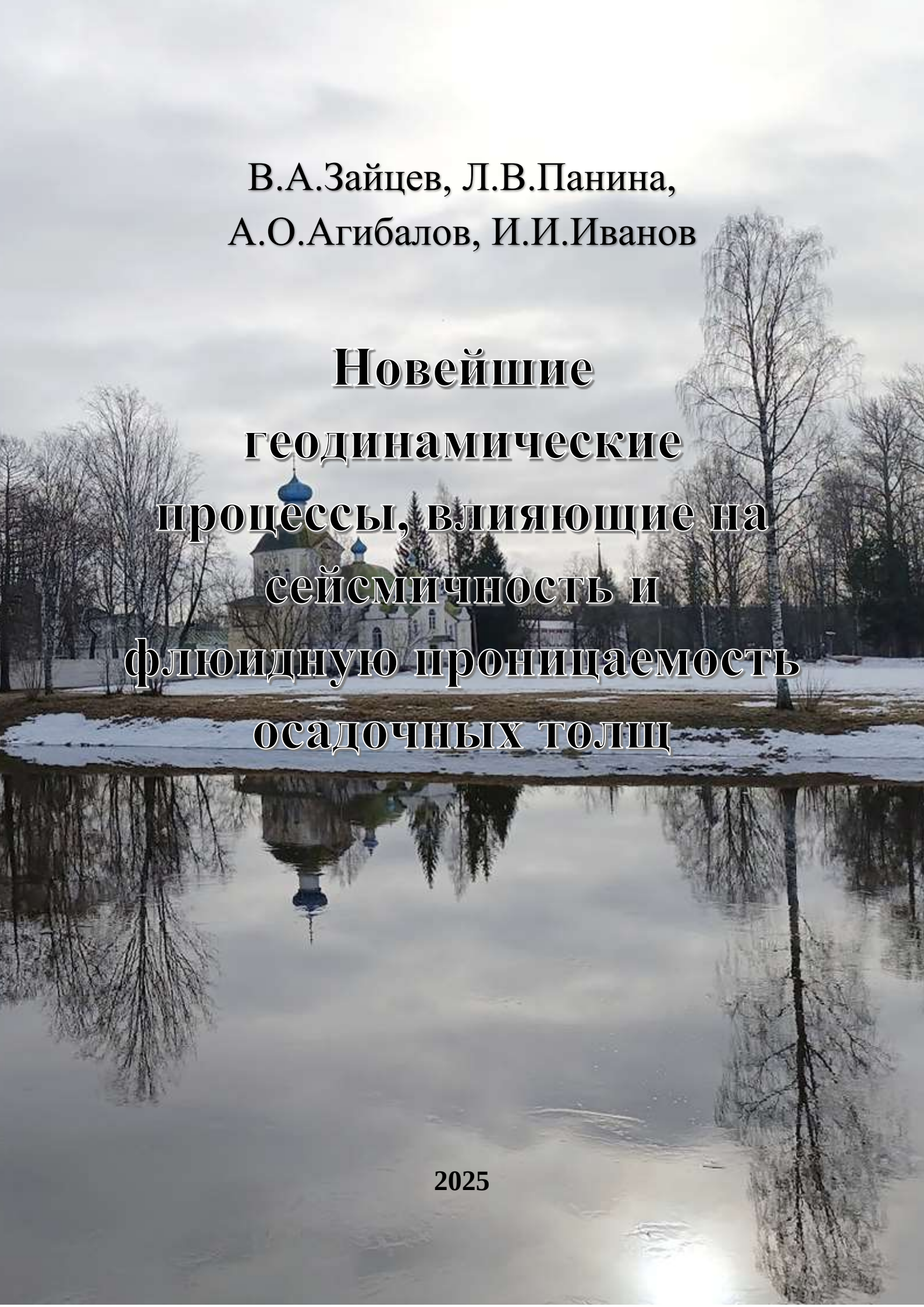


The background of the cover is a photograph of a winter scene. In the middle ground, there is a church with a prominent blue onion dome and other smaller domes. The church is surrounded by bare, snow-covered trees. In the foreground, a calm body of water, possibly a pond or a slow-moving stream, reflects the church and the surrounding trees. The sky is overcast and grey. The overall tone is quiet and somewhat somber, typical of a winter day.

В.А.Зайцев, Л.В.Панина,
А.О.Агибалов, И.И.Иванов

**Новейшие
геодинамические
процессы, влияющие на
сейсмичность и
флюидную проницаемость
осадочных толщ**

2025

УДК 551.248.2

ББК 26.322.5

Н72

Коллектив авторов:

Владимир Александрович Зайцев, Людмила Викторовна Панина, Алексей Олегович Агибалов, Илья Игоревич Иванов

Н72 **Новейшие геодинамические процессы, влияющие на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ.** – М.: Издательство «Перо», 2025. – Мб. [Электронное издание]. – Систем. требования: процессор x86 с тактовой частотой 500 МГц и выше; 512 Мб ОЗУ; Windows XP/7/8; видеокарта SVGA 1280x1024 High Color (32 bit). – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-00258-441-3

На кафедре динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, начиная с 2016 года, проводятся исследования по созданию методики оценки вторичной проницаемости с помощью новейшей геодинамики, а также применение этой технологии для прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов и сейсмичности. Основной задачей проекта является выявление геодинамически активных зон, где реализуется повышенная трещиноватость и связанная с ней флюидная проницаемость. Данная научно-техническая проблема особенно актуальна в связи с поиском и разведкой месторождений нефти и газа, имеющих нетрадиционные ловушки в трещиноватых коллекторах. С изучением вторичной проницаемости связаны технологии извлечения метана из угольных пластов и сланцев. Распределение зон повышенной трещиноватости и, как следствие, флюидной проницаемости зависит от новейшей геодинамической активности района, которая проявляется на поверхности Земли в виде новейших дислокаций, отраженных в рельефе, повышенных значениях теплового потока, сейсмичности и часто подчеркивается скоплением месторождений нефти и газа. Предлагаемые работы требуют комплексных геолого-геоморфологических исследований, дополненных построением современных компьютерных и тектонофизических моделей новейших геодинамических процессов, влияющих на флюидную проницаемость геологической среды.

УДК 551.248.2

ББК 26.322.5

ISBN 978-5-00258-441-3

© Авторы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Новейшая тектоника и геодинамика Восточно-Европейской платформы и ее обрамления	5
1.1. Введение	5
1.2. Модель новейшей проницаемости Восточно-Европейской платформы	8
1.3. Детальное трехмерное моделирование новейшей геодинамики западной части Восточно-Европейской платформы	26
1.4. Детальная неотектоника Северного Прикаспия	39
1.5. Неотектоника Волго-Уральской антеклизы	48
1.6. Структурно-геоморфологический анализ Урала и прилегающих областей	55
1.7. Неотектоника и геодинамика Скифской плиты	68
2. Новые возможности комплексного анализа морфометрических характеристик рельефа, астрономических параметров и данных ГНСС для развития методов сейсмического прогноза по месту и времени	90
3. Модель современного напряжённого состояния и фильтрационные параметры Даниловского месторождения (Иркутская область)	102
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	136

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, начиная с 2016 года, проводятся исследования по созданию методики оценки вторичной проницаемости с помощью новейшей геодинамики, а также применение этой технологии для прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов и сейсмичности. Для этого был разработан и апробирован комплекс методов, включающий анализ структурно-геоморфологических параметров, данных дистанционного зондирования, результатов сейсмического изучения недр, построение 3D компьютерных моделей напряженного состояния, построение кинематических моделей, структурный парагенетический анализ, анализ фильтрационных параметров работы скважин, моделирование вторичных фильтрационно-емкостных свойств горных пород, компьютерное и физическое моделирование. Авторы данной монографии, в течение ряда лет проводят работы по созданию новой электронной версии карты новейшей тектоники Восточно-Европейской платформы нового поколения. Целью данных исследований являлось, выявление особенности новейшего строения различных в историко-геологическом отношении структурных элементов Земной поверхности и определение степени влияния на эту поверхность глубинных деформаций. Особое внимание уделялось корреляции выявленных новейших структур и глубинных дислокаций фундамента для платформенных территорий. В частности, в 2024 году была издана монография «Неотектоника Восточно-Европейской платформы и сопредельных территорий» [Панина, Зайцев, 2024]. В монографии изложены результаты комплексных структурно-геоморфологических исследований различных районов Восточно-Европейской платформы и ее обрамления: Воронежской и Волго-Уральской антеклиз, Московской, Балтийской и Прикаспийской синеклиз, прилегающих к платформе на юге эпигерцинской Скифской плиты, на северо-востоке Тимано-Печорской эпибайкальской платформы (Печорской плиты), а также граничащих с платформой на востоке Предуральского прогиба и Уральского орогена. В основу изучения положен комплекс методов, базирующихся на появившихся в последнее время компьютерных технологиях и современных космических изображениях с высоким разрешением, позволяющих выявлять малоамплитудные выраженные в рельефе дислокации, что существенно расширяет наши представления о новейшей тектонике и геодинамике равнинных территорий в масштабе 1:500 000 и крупнее.

1. Новейшая тектоника и геодинамика Восточно-Европейской платформы

1.1. Введение

Монография, посвященная «Неотектоника Восточно-Европейской платформы и сопредельных территорий» [Панина, Зайцев, 2024], явилась основой для написания данной работы. Авторы данной монографии, которые являются сотрудниками лаборатории исследования геокатастроф кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, в течение ряда лет проводят работы по созданию новой электронной версии карты новейшей тектоники Восточно-Европейской платформы нового поколения. Карты неотектоники традиционно представляют собой совокупность обозначений, отражающих амплитуду вертикальных тектонических движений, которые привели к созданию современного рельефа. Помимо амплитуд на этих картах находят свое отражение дизъюнктивные структуры в виде новейших разрывных нарушений и различные дополнительные знаки, показывающие особые, чаще всего современные, процессы, наблюдаемые на данной территории (вулканы, землетрясения, цунами, грязевые вулканы и т.п.). При этом остаются вне зоны рассмотрения горизонтальные деформации. Исключением являются данные GPS там, где проводились эти специализированные исследования. Современные компьютерные методы позволяют существенным образом дополнить этот пробел и показать на любой территории горизонтальные составляющие новейших тектонических движений в виде стрелок, указывающих направление перемещения отдельных выбранных реперов, где длина стрелки пропорциональна амплитуде смещения. Чаще всего местоположение этих значков задается по сетке с выбранным интервалом, зависящем от масштаба карты. В отличие от данных GPS, полученные векторы горизонтального перемещения не являются результатами проведенных наблюдений, а расчетными параметрами геодинамической модели, учитывающей модель напряженного состояния, местоположение разрывных нарушений, условия (ориентировку и кинематику) внешней нагрузки, приложенной к изучаемой территории. Методика выявления участков территории России, на которых формируются участки повышенной проницаемости, предполагает выявление геодинамически активных зон (рисунок 1.1), где проявляется повышенная флюидная проницаемость. Она контролируется следующими параметрами: активными современными вертикальными и горизонтальными движениями, сейсмичностью, напряженным состоянием, степенью раздробленности и др.

Комплексное изучение данных параметров с помощью современных методов,

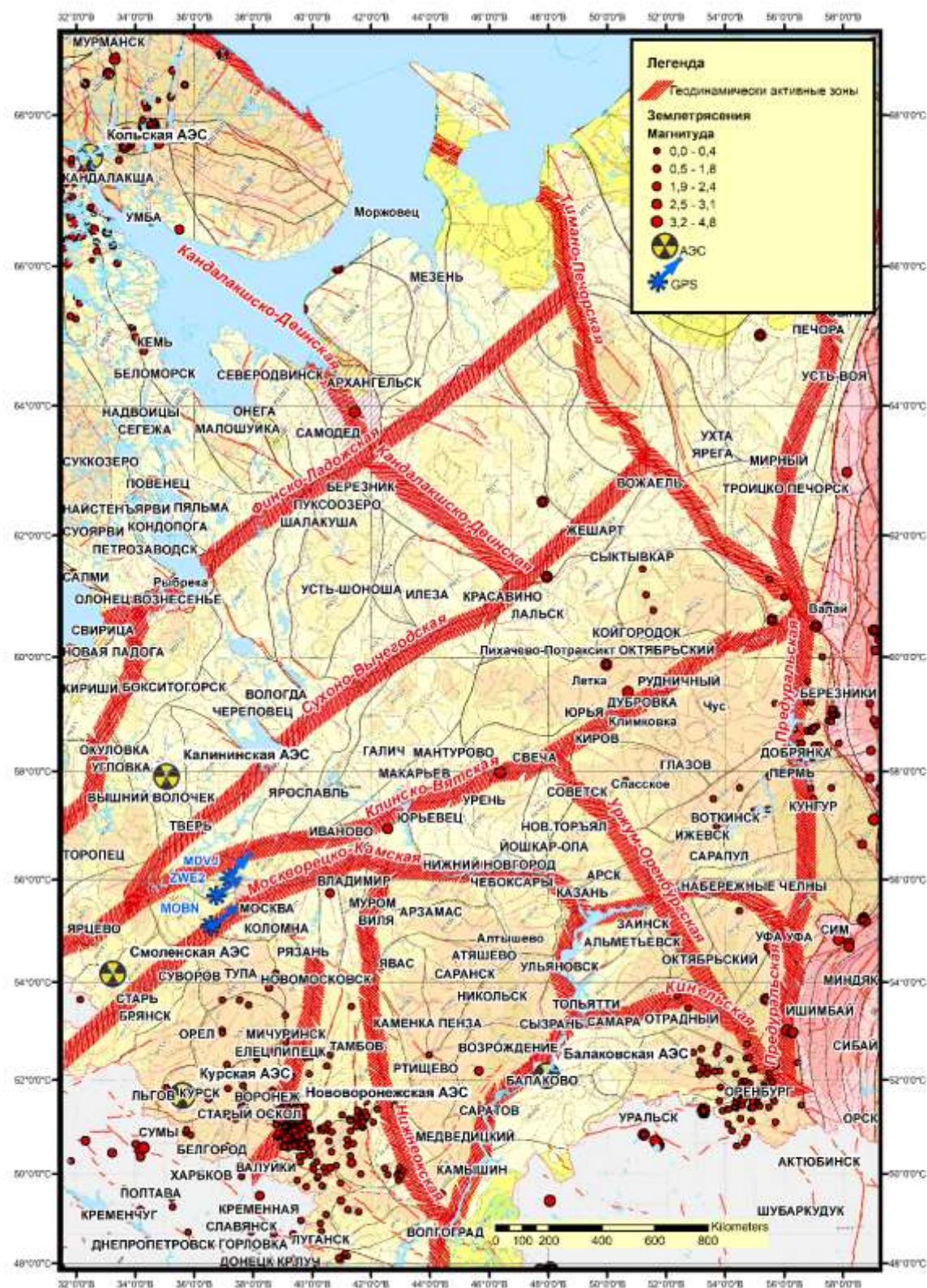


Рисунок 1.1. Фрагмент карты неотектонического районирования территории Российской Федерации под редакцией Н.В. Межеловского (2020) с дополнениями авторов.

реализованных в компьютерных программах 3D геологического моделирования, позволяет, в определенной степени, решить задачу оценки вторичных фильтрационных параметров. В данной работе основным инструментом оценки упругих и пластических деформаций являлось трехмерное геодинамическое моделирование, выполненное с помощью специализированного модуля RMFracture, являющегося инструментом программного комплекса IrapRMS компании ROXAR.

Использование данной технологии предоставляет возможность интегрировать разнообразную структурно-геологическую информацию для того, чтобы построить цифровую модель трещиноватости (Discrete Fracture Network), а затем методом «двойного пространства» спрогнозировать фильтрационно-емкостные свойства пород. В том случае, если трещины имеют значительную густоту и степень раскрытости, их влияние на величину флюидной проницаемости будет определяющим.

В настоящее время созданы компьютерные структурно-геологические трехмерные модели и проведены оценки фильтрационно-емкостного пространства, которые позволили выявить проницаемость земной коры в пределах Восточно-Европейской платформы, Кавказа, Предкавказья, Урала, Западной и Восточной Сибири, отдельных районов Забайкалья и Дальнего Востока, Сахалинской области и Камчатки. Технология построения геодинамических моделей проницаемости рассматриваемых территорий основана на свойствах интегрируемой пористой среды с развитой трещиноватостью, где параметры трещин зависят от геолого-геодинамических факторов. Несмотря на принципиальную невозможность определить параметры каждой трещины, такие характеристики, как плотность трещин, их ориентировка, могут быть предсказаны с помощью тектонофизических методов или трендов. Напряженное состояние рассматриваемой территории было рассчитано с помощью упругой конечно-элементной модели (Elastic Stress). Данный метод позволяет сравнительно точно описывать возможные контактные взаимодействия, в том числе при больших деформациях с образованием складок, а также моделировать появление трещин в результате деформирования при заданных критериях разрушения. При этом, региональное поле напряжений рассматривается как граничное условие. В результате приложенной нагрузки происходит смещение по существующим разломам, что приводит к появлению локального поля напряжений. Основная цель такого геодинамического моделирования — установление локального поля напряжений и оценка его влияния на возникновение новых или изменение степени раскрытости существующих трещин. При этом реконструкция напряженно-деформированного

состояния горного массива имеет первостепенное значение для прогноза проницаемости земной коры.

В качестве примера рассмотрим построение модели глубинной проницаемости Восточно-Европейской платформы в региональном масштабе. Новейший структурный план древней Восточно-Европейской платформы, формирующийся на крупных, различных в историко-геологическом отношении, структурных элементах: синеклизах (Московская, Прикаспийская), антеклизах (Воронежская, Волго-Уральская), щитах (Украинский, Балтийский), отличается в разных регионах и подчеркивается особенностями современного рельефа. В геоморфологическом отношении Восточно-Европейская платформа соответствует Русской равнине с прямыми, обращенными, и частично унаследованными морфоструктурами, что позволило предшественникам выделить в ее пределах краевую зону с преобладанием прямых морфоструктур и внутреннюю зону, где господствуют обращенные морфоструктуры [Равнины..., 1974].

1.2. Модель новейшей проницаемости Восточно-Европейской платформы

Оценка внешнего поля напряжений была выполнена с помощью анализа сейсмичности. В пределах Восточно-Европейской платформы были изучены следующие каталоги землетрясений: база данных «Землетрясения России» ЕГС РАН, база данных Американской геологической службы (USGS), данные университета Хельсинки, базы данных по областям Воронежской, Пермской и Оренбургской. Собранный сводный каталог (рисунок 1.2.1А) был проанализирован с помощью программы Fault Kin на предмет наличия землетрясений с выполненным решением фокальных очагов механизмов и отобраны 19 событий, расположенных по периферии платформы. Суммарная стереограмма, построенная для этих землетрясений (рисунок 1.2.1Б.), показала, что внешнее поле напряжений на момент времени с 1976 по 2018г. имело сдвиговую кинематику с направлением максимального сжатия 332° и углом падения 5° , а растяжения 240° с углом падения 18° . При этом глубина, на которой были зафиксированы эти события составляла около 16 км, а магнитуды находились в интервале от 2,1 до 5,0. Вполне вероятно, что эти параметры являются внешним полем напряжения для рассматриваемой территории. Получив эти исходные данные, мы можем перейти к построению моделей поля напряжения и величины перемещения Восточно-Европейской платформы. Для этого необходимо добавить лишь параметры о степени неоднородности данного объекта.

Согласно нашим исследованиям, новейшая структура Восточно-Европейской платформы представляет собой сочетание поднятий и впадин разного ранга, нарушенных геодинамически активными зонами (структурами первого ранга), малоамплитудными разрывами и слабыми зонами (линеаментами), создающими в рельефе сводово-блоковый стиль дислокаций. Поднятия преобладают, что свидетельствует о вовлечении Восточно-Европейской платформы на новейшем этапе в процесс воздымания. Платформа испытывает активизацию, которая выражается в разрастании частных поднятий на фоне сокращения впадин. Примерами являются Окско-Донской прогиб, практически весь «заросший» локальными поднятиями; Прикаспийская впадина, наиболее прогнутая (до 22 км) по фундаменту структура, которая в современном рельефе также осложнена многочисленными, с амплитудами от первых метров до 250 м, поднятиями.

Новейшие поднятия и впадины осложнены малоамплитудными разрывами, зонами трещиноватости, которые скрыты под чехлом четвертичных отложений, и проявляются в рельефе в виде слабых зон или линеаментов. Выявленная регматическая сеть линеаментов группируется, как и везде, в ортогональную и диагональную системы. Эти системы по-разному доминируют в тех или иных районах, отражая степень раздробленности платформенного чехла и структурные неоднородности фундамента. Некоторые слабые зоны фрагментарно наследуют разломы фундамента и подтверждаются газовой эманацонной съемкой (гелиевой, радоновой, водородной), результатами космической геодезии, проявлениями сейсмичности, диапиризмом, повышенными значениями теплового потока и др.

Было установлено, что границами субпровинций и зон (более мелких подразделений внутри субпровинций) являются геодинамически активные зоны (ГДАЗ), представляющие собой, согласно определению В.И. Макарова [Макаров, 1996], «линейные или изометричные участки (объемы) земной коры разных масштабов, в которых в силу различных причин имеются или могут возникать условия для концентрации и разрядки тектонических напряжений, повышенных градиентов движений и деформированности горных пород». Протяженные слабые зоны (линеаменты) хорошо выражены в рельефе. Согласно карте неотектонического районирования, в пределах Восточно-Европейской платформы к геодинамически активным зонам первого ранга относятся Клинско-Вятская, Финско-Ладожская левосторонние, Кандалакшско-Двинская и Волжско-Каспийская сбросовые зоны (рисунок 1.1).

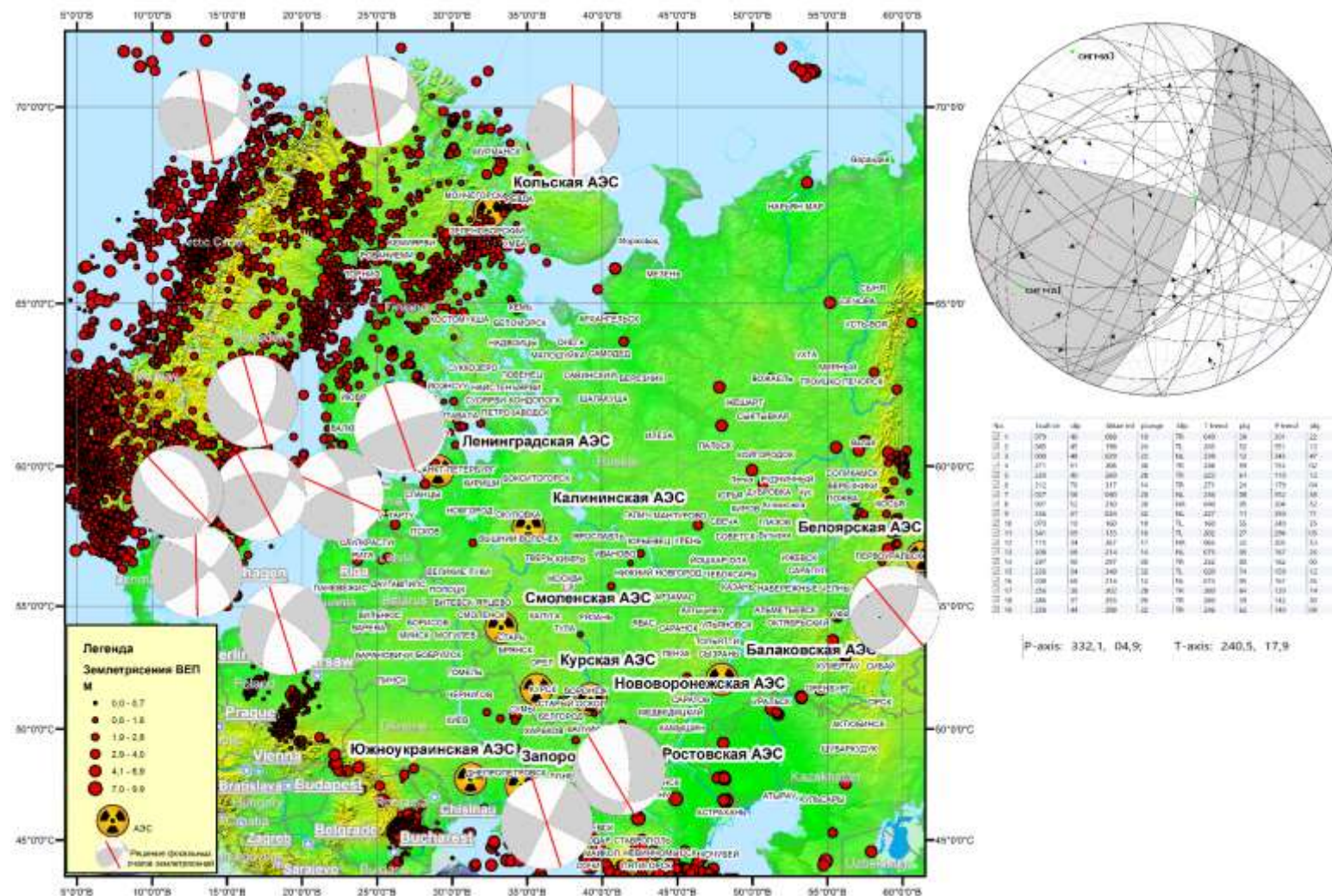


Рисунок 1.2.1. Схема сейсмической активности Восточно-Европейской платформы. А - карта эпицентров землетрясений и решений фокальных механизмов. Б – суммарная стереограмма для 19-ти землетрясений, для которых построены решения фокальных механизмов и рассчитаны положения возможных осей сжатия и растяжения, удовлетворяющие большинству событий, построенная с помощью программы Fault Kin.

Клинско-Вятская и Москворецко-Камская геодинамически активные зоны являются по существу границами выделенной Смоленско-Дмитровско-Ветлужской широкой субширотной полосы, протягивающейся через всю Русскую плиту до Урала. Москворецко-Камская геодинамически активная зона на разных отрезках имеет различное простираие: северо-восточное на западе, широтное на центральном, средневожском отрезке, а на востоке она дугообразна. Финско-Ладожская геодинамически активная зона расположена на границе Балтийского щита и Русской плиты и маркируется Финским заливом, продолжающимся на северо-востоке Восточно-Балтийским рифтом среднего неоплейстоцена, а также Ладожским и Онежским озерами-впадинами, которые разделены структурными перемычками.

Далее она следует по юго-восточной границе Архангельской субпровинции до Тимана. Финско-Ладожская ГдАЗ входит в Скандинавскую геодинамическую систему первого ранга, а образование ее связывается с развитием Балтийского щита. Кандалакшско-Двинская ГдАЗ северо-западного простираия представлена Кандалакшским новейшим грабенем, структурным продолжением которого к юго-востоку является Северо-Двинская депрессия. Кандалакшский грабен ограничен крутыми бортами.

Предуральская правосторонняя ГдАЗ протягивается вдоль Уральского орогена на ~2000 км и в целом соответствует западной границе Предуральского краевого прогиба. Сложное внутреннее строение ГдАЗ связано с особенностями строения Уральского орогена. Волжско-Каспийская ГдАЗ субмеридионального простираия является зоной структурных несогласий и выражена границами новейших региональных структур. Так называемая «линия Карпинского» расположена в области сочленения Восточно-Европейской и Западно-Арктической платформ и протягивается на ~500 км вдоль Мурманского побережья Кольского полуострова. Она рассматривается как тектоническая граница между Баренцевой плитой и Балтийским кристаллическим щитом, по которой кристаллический фундамент ступенчато погружен в сторону моря. «Линия Карпинского» маркируется разломами и зонами сгущения трещин в кристаллических породах и является неотектонически активной и тектонически предопределенной. Сухоно-Вычегодская геодинамически активная зона в основном расположена в центральной части Московской синеклизы (севернее Среднерусского авлакогена), а на северо-востоке — на границе Мезенской синеклизы и Волго-Уральской антеклизы. Она проявлена в рельефе эрозионно-тектоническими прогибами и крутыми уступами. Лосевско-Мамонская геодинамически активная зона прослеживается на

западе Окско-Донского прогиба, который несогласно наложен на древнюю структуру северо-восточного крыла Воронежской антеклизы и Пачелмский авлакоген северо-западного простирания. Окско-Донской прогиб трактуется как зона современного растяжения земной коры. Нижнеокская ГдАЗ приурочена к восточному борту Окско-Донского прогиба, к границе его с Приволжским (Токмовским) поднятием. Уржум-Оренбургская геодинамически активная зона северо-западного простирания региональных новейших дислокаций протягивается на ~800 км при ширине до 50 км. Кинельская геодинамически активная зона дугообразной формы проявлена границей неотектонических структур регионального ранга. Используя выделенные ранее геодинамически активные зоны, как неоднородности регионального ранга (рисунок 1.2.2), были построены модели кинематики и напряженного состояния

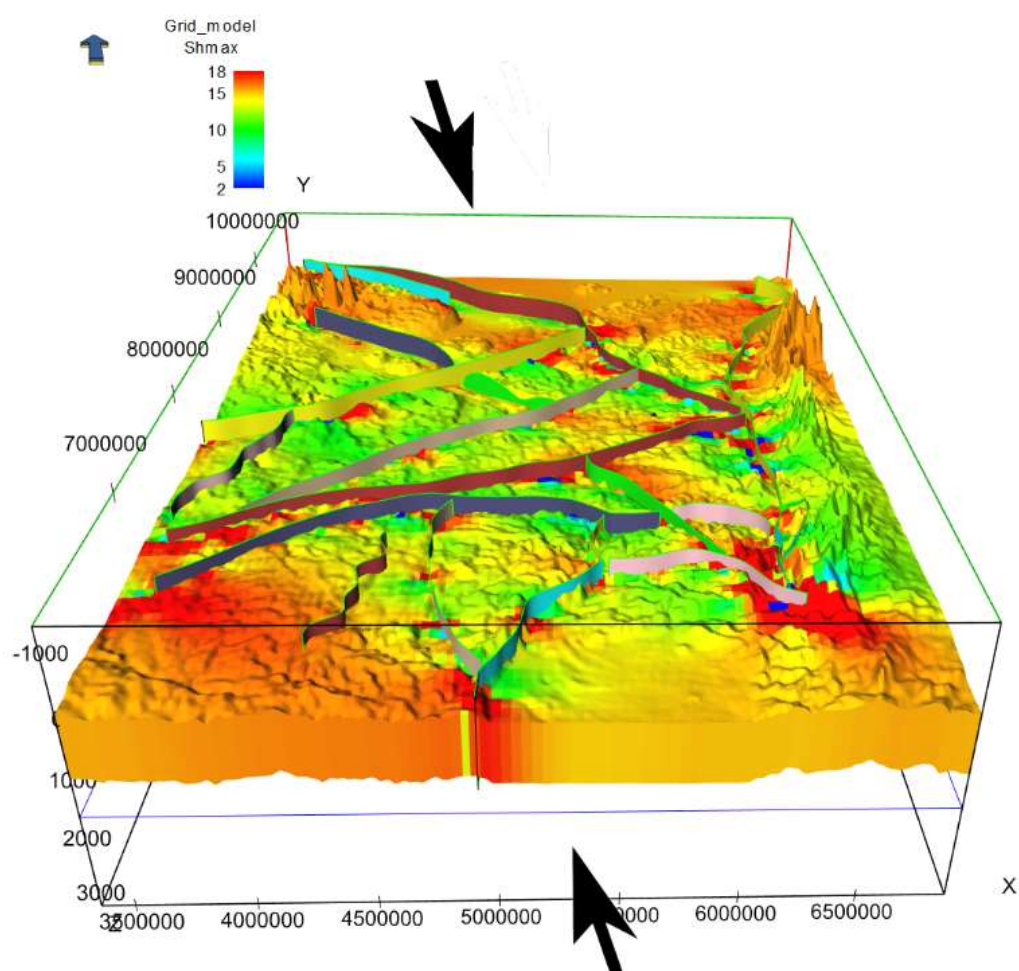


Рисунок 1.2.2. 3D геомеханическая модель современных тектонических движений основания Восточно-Европейской платформы, построенная с помощью программного комплекса IrapRMS на основе решения фокальных очагов землетрясений и геодинамических активных зон, показанных на [Карта..., 2020]

Восточно-Европейской платформы (рисунки 1.2.3, 1.2.4) и вероятности формирования современных неотектонических разрывных нарушений, связанных с землетрясениями Восточно-Европейской платформы (рисунок 1.2.5).

Выявленные комплексными структурно-геоморфологическими исследованиями новейшие поднятия и разделяющие их впадины имеют различную, от изометричной до вытянутой в том или ином направлении конфигурацию, которая подчеркивается, как правило, доминирующими простирающимися слабыми зонами (линеаментами). Объединение структур сходной конфигурации и простирающихся, нарушенных слабыми зонами, позволяет выделить субпровинции, что в целом согласуется с картой неотектонического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:2,5 млн. под ред. Межеловского [Карта..., 2020], а термин «субпровинция» также принадлежит авторам этой карты. Нашими исследованиями уточнены границы этих подразделений, при этом их названия сохранены. В пределах изученной нами территории Восточно-Европейской платформы выделены субпровинции, которым дается краткое описание (рисунки 1.2.3; 1.2.4; 1.2.5).

На северо-западе расположена Псковско-Новгородская субпровинция (1), включающая Ленинградско-Великолугскую и Новгородскую зоны, состоящую, главным образом, из низких впадин. В их пределах выделяются частные малоамплитудные поднятия (амплитуда до 85 м), нарушенные слабыми зонами доминирующего ССВ простирающихся. На востоке к Новгородской зоне примыкает Московская субпровинция (2), объединяющая ряд по-разному ориентированных поднятий. Преобладают структуры, вытянутые в субмеридиональном и север-северо-восточном направлении, осложненные слабыми зонами. Северо-западнее расположены структуры Мезенской субпровинции (5), включающей поднятия, вытянутые в северо-восточном и северо-западном направлении, контролируемые и нарушенные линеаментами такой же ориентировки. Смоленско-Ветлужская субпровинция (6) включает на юго-западе серию субмеридионально вытянутых поднятий, сменяющихся на субширотные (Клинско-Дмитровское или Московское). Здесь преобладают линеаменты северо-восточного простирающихся. Южнее расположена Среднерусская субпровинция (7), где существенную роль в структуре играют поднятия, вытянутые в северо-восточном и субмеридиональном направлении, нарушенные северо-восточными и северо-западными линеаментами. На востоке к субпровинции примыкают субмеридионально вытянутые структуры Окско-Донской субпровинции (8). Доминируют слабые зоны северо-западного простирающихся. Юго-западнее расположена Доно-Донецкая субпровинция (9), граничащая на юге со

Скифской плитой и преобладающим северо-западным трендом простираения новейших дислокаций.

На северо-востоке Восточно-Европейской платформы серия структур Вятско-Камской субпровинции (10), объединяет поднятия разной конфигурации: изометричные, субширотные, вытянутые в северо-восточном и субмеридиональном направлении. Последние развиты преимущественно на востоке. Наиболее протяженные линеаменты имеют северо-восточное и субмеридиональное простираение. Восточнее расположена Предуральская субпровинция (11), граничащая с Уральским горным сооружением по крупному надвигу. Новейшие поднятия этой субпровинции, как правило, субмеридиональны и параллельны уральским структурам. Преобладают линеаменты северо-западного и северо-восточного простираения. Южнее Вятско-Камской, в Татарско-Башкирской субпровинции (12) расположено крупное дугообразное субширотное поднятие (Белебеевское), локальные структуры которого на востоке вытянуты в север-северо-восточном направлении, следуя согласно простираению крупного, пограничного с платформой надвига Урала. Линеаменты здесь представляет собой комбинацию северо-восточного и северо-западного простираения. На западе к провинции примыкают структуры Приволжской субпровинции (13), сочетающие преимущественно субширотные, иногда изометричные, нарушенные, как правило, линеаментами северо-западного простираения, поднятия. Расположенная восточнее Окраинно-Прикаспийская провинция (14) включает, главным образом, субширотные и вытянутые в северо-западном направлении, а иногда изометричные поднятия, нарушенные линеаментами северо-западного простираения. В Прикаспийской субпровинции (15), примыкающей с юга к Окраинно-Прикаспийской, преобладают малоамплитудные поднятия изометричной формы, на востоке поднятия вытягиваются в северо-западном направлении. Доминируют линеаменты северо-западного простираения, реже выявлены субширотные, субмеридиональные и северо-восточные простираения.

Границы субпровинций, которые разделяют по-разному ориентированные и отличающиеся по конфигурации новейшие дислокации, совпадают с геодинамически активными зонами, что указывает на различную кинематику формирования дислокаций.

Таким образом, используя выделенные ранее геодинамически активные зоны, как неоднородности регионального ранга, анализ решения фокальных очагов землетрясений, как внешнее (региональное) поле напряжений, были рассчитаны параметры необходимые для прогнозирования вторичной проницаемости Восточно-Европейской платформы.

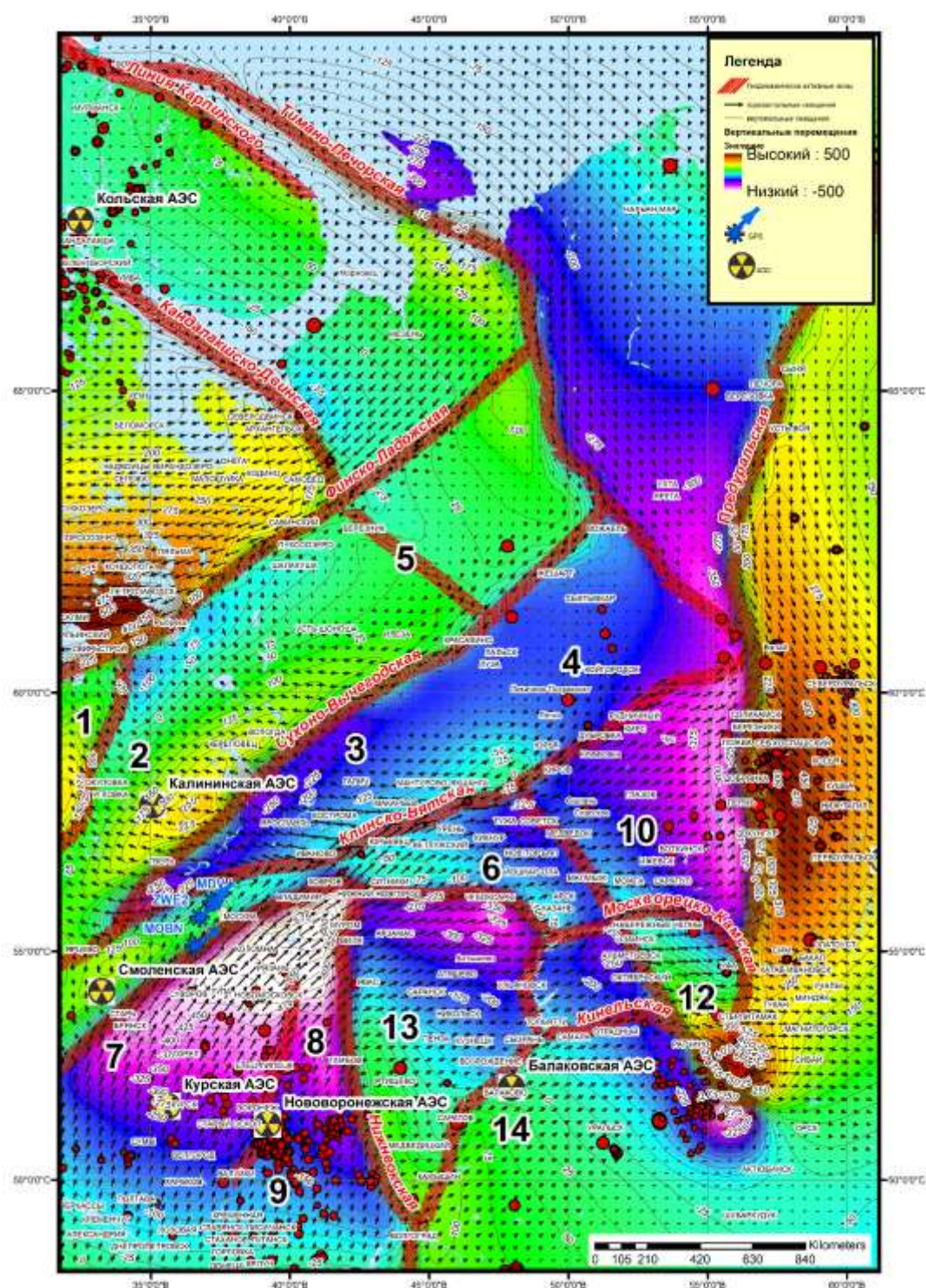


Рисунок 1.2.3. Кинематическая модель новейших тектонических движений Восточно-Европейской платформы, рассчитанная как результат внешнего сдвигового поля напряжений с направлением максимального сжатия 332° и углом падения 5° , и растяжения 240° с углом падения 18° . Перемещения контролировались геодинамически активными зонами (ГдАЗ). Цветом показаны вертикальные перемещения, а стрелками – горизонтальные. Цифрами показаны субпровинции, описанные в тексте.

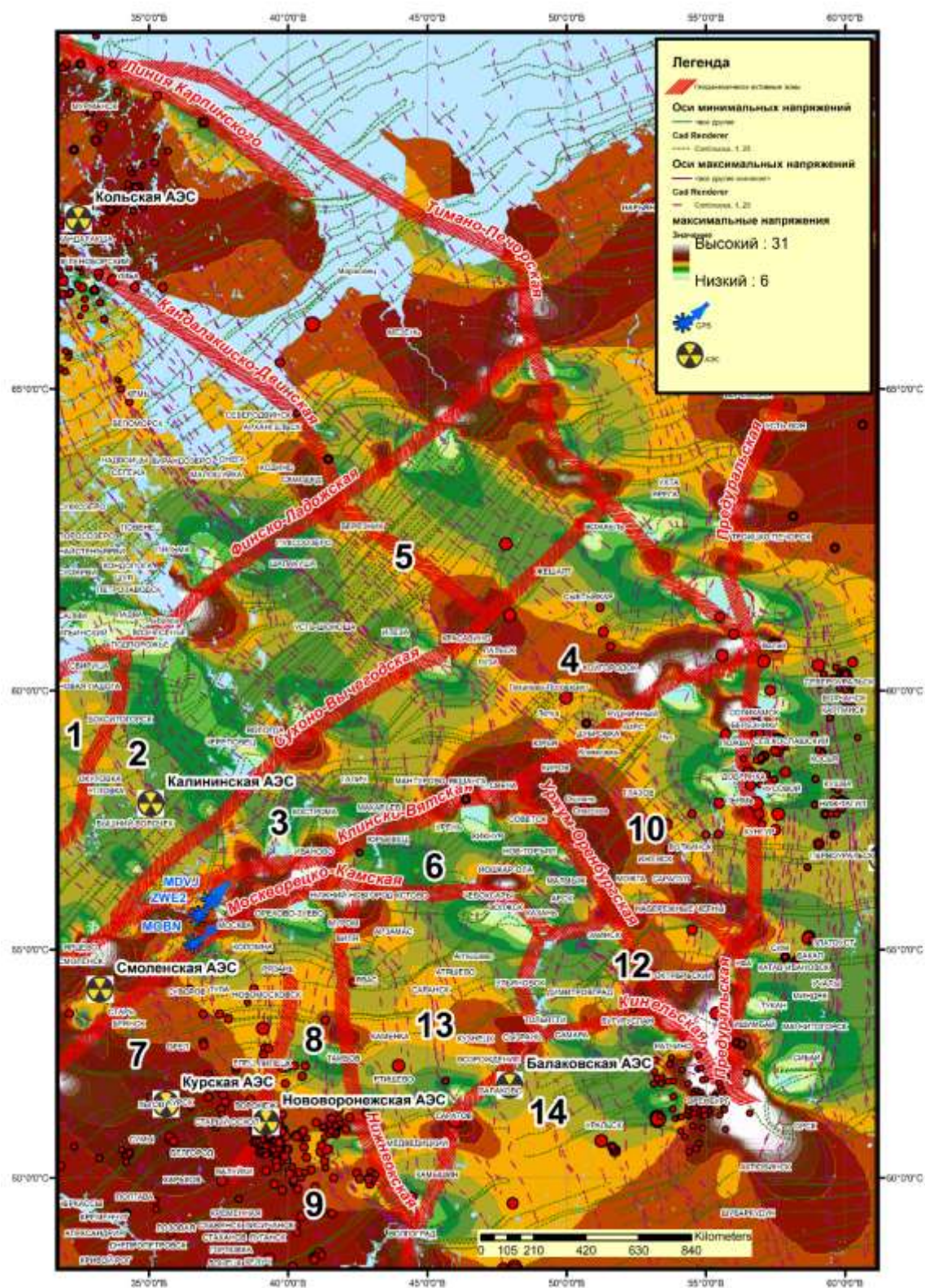


Рисунок 1.2.4. Карта неотектонического районирования и ориентировки полей напряжений Восточно-Европейской платформы по (Карте неотектонического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:2,5 млн. под ред. Н.В.Межеловского,2020) с изменениями и дополнениями. Цифрами показаны субпровинции, описанные в тексте.

Названия субпровинций в тексте.

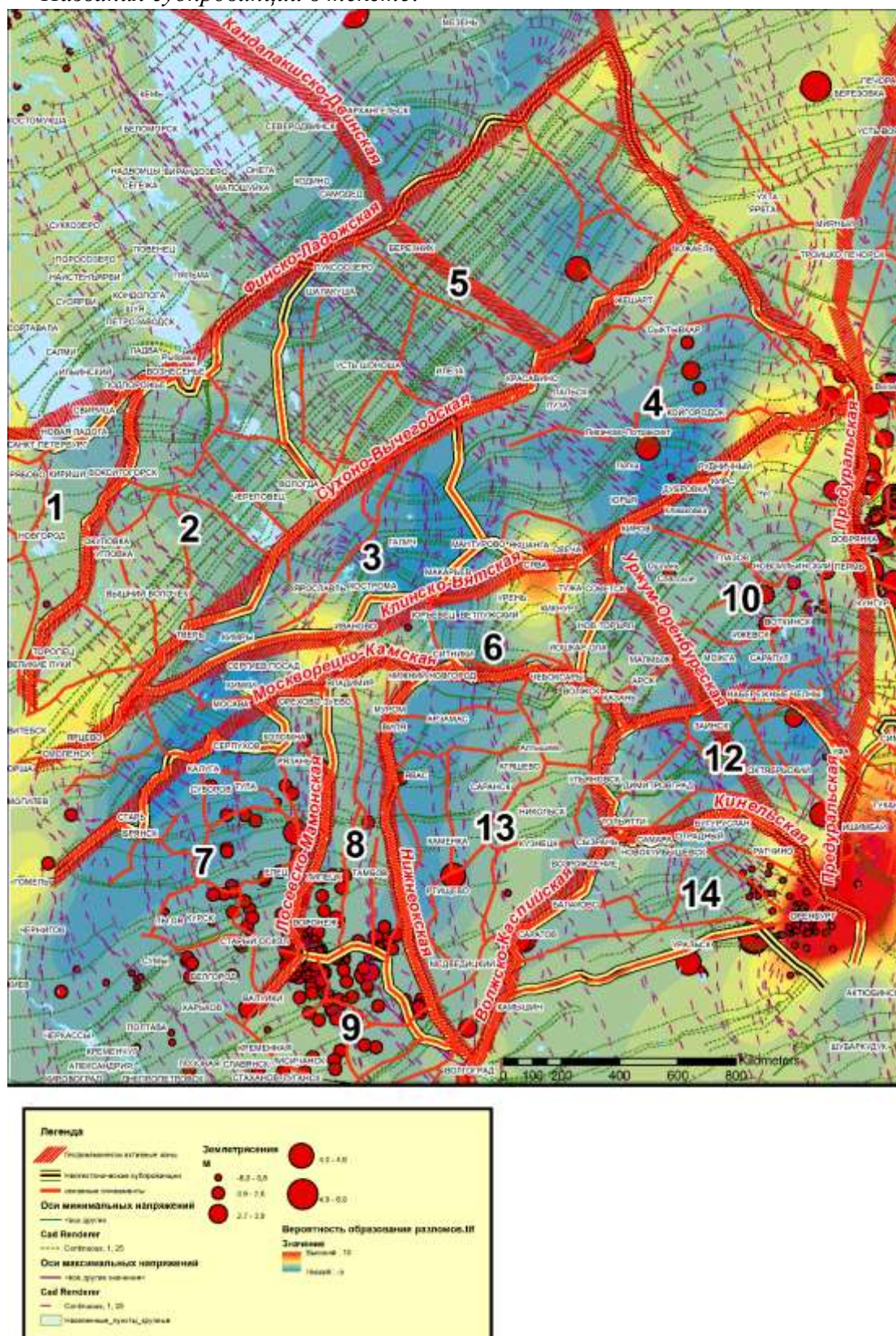


Рисунок 1.2.5. Карта прогнозной вероятности формирования современных неотектонических разрывных нарушений (FractureLike), связанных с землетрясениями Восточно-Европейской платформы. Цифрами показаны субпровинции, описанные в тексте.

На следующем этапе, создания цифровой модели трещиноватости (Discrete Fracture Network) были рассчитаны шесть параметров, которые определяют появление новых трещин или изменение степени раскрытости существующих неоднородностей: кривизна структурной поверхности (антиформы), ориентировка трещин – MaxCurvatureDirection; кривизна структурной поверхности (синформы), близость к разломам – Fault Proximity, ориентировка трещин – Faultstrike; близость к концам разломов – FaultTipProximity, величина горизонтального смещения – DisplacementX-Y, вероятность появления новых трещин – FractureLike (см. рисунок 1.2.5), ориентировка трещин – Shmaxdir.

С помощью специального программного обеспечения Create Fracture Model создается основа для аналитической дискретной модели трещиноватости (рисунок 1.2.6). В этой программе трещины генерируются случайным распределением «затравок» и создаются в соответствии с плотностью рассчитанных трендов и данными об их ориентировках. Трещины «выращиваются» до тех пор, пока не будет достигнута требуемая плотность. На следующем шаге моделирования оценивается влияние длины и изменчивости параметров трещин. Необходимо добиться наилучшего соответствия сети трещин геолого-геофизическим или эманационным параметрам. Далее, после построения цифровой дискретной модели трещиноватости, можно оценить сообщаемость полученной сети разломов и перейти к гидродинамическому моделированию проницаемости.

И, наконец, на завершающем этапе было выполнено интегрирование всех имеющихся в нашем распоряжении данных и построение общей схемы относительной проницаемости территории Восточно-Европейской платформы. Созданы модели величины трещинной пористости и вторичной проницаемости Восточно-Европейской платформы (рисунки 1.2.7; 1.2.8), на которых показаны места с высокими значениями относительной проницаемости, обусловленные направлением горизонтальных тектонических перемещений, полем напряжений и местоположением современных геодинамически активных зон. Также на прогнозную карту нанесены эпицентры землетрясений и глубинные гелиевые аномалии, подтверждающие участки с высокой проницаемостью. На данной карте мы видим большое количество зон с высокой эманационной проницаемостью геологической среды. Выполнив сопоставление полученных материалов с картой проницаемости земной коры по данным гелиевых исследований (рисунок 1.2.9), удалось с высокой степенью достоверности, подтвердить зоны повышенной проницаемости для нескольких участков (рисунки 1.2.10 – 1.2.12).

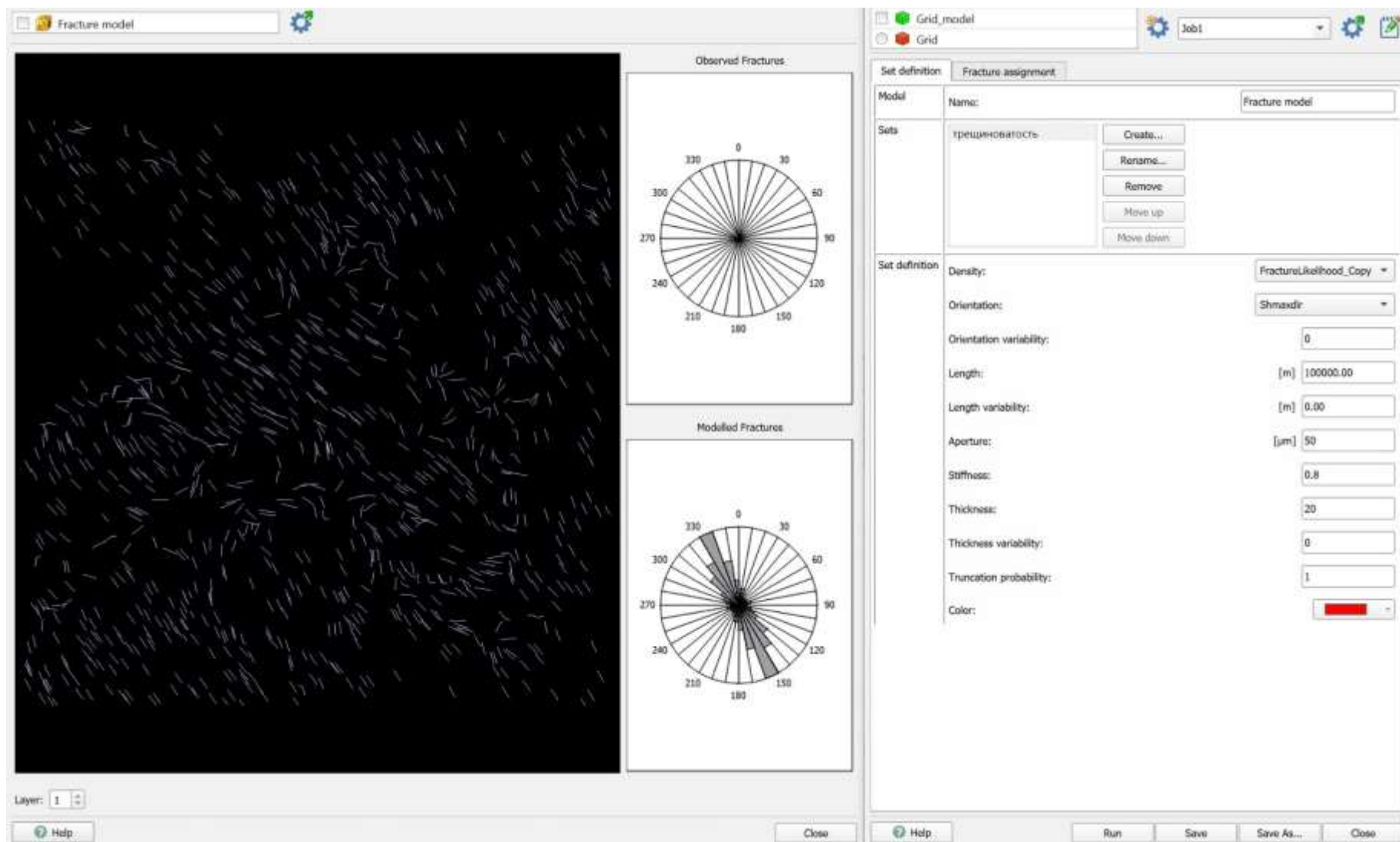


Рисунок 1.2.6. Дискретная модель трещиноватости созданная с помощью специального программного обеспечения Create Fracture Model

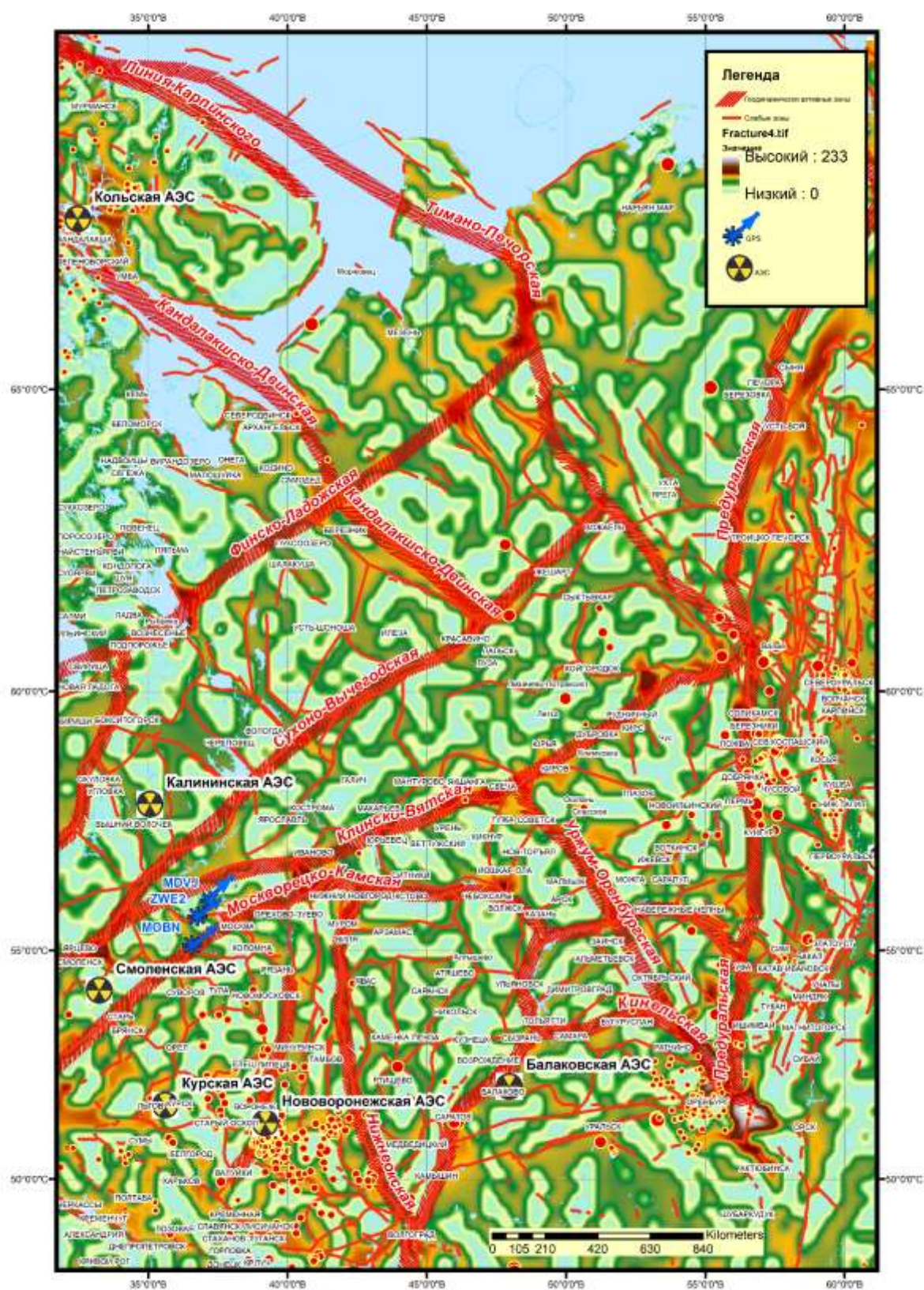


Рисунок 1.2.7. Модель величины трещинной пористости Восточно-Европейской платформы

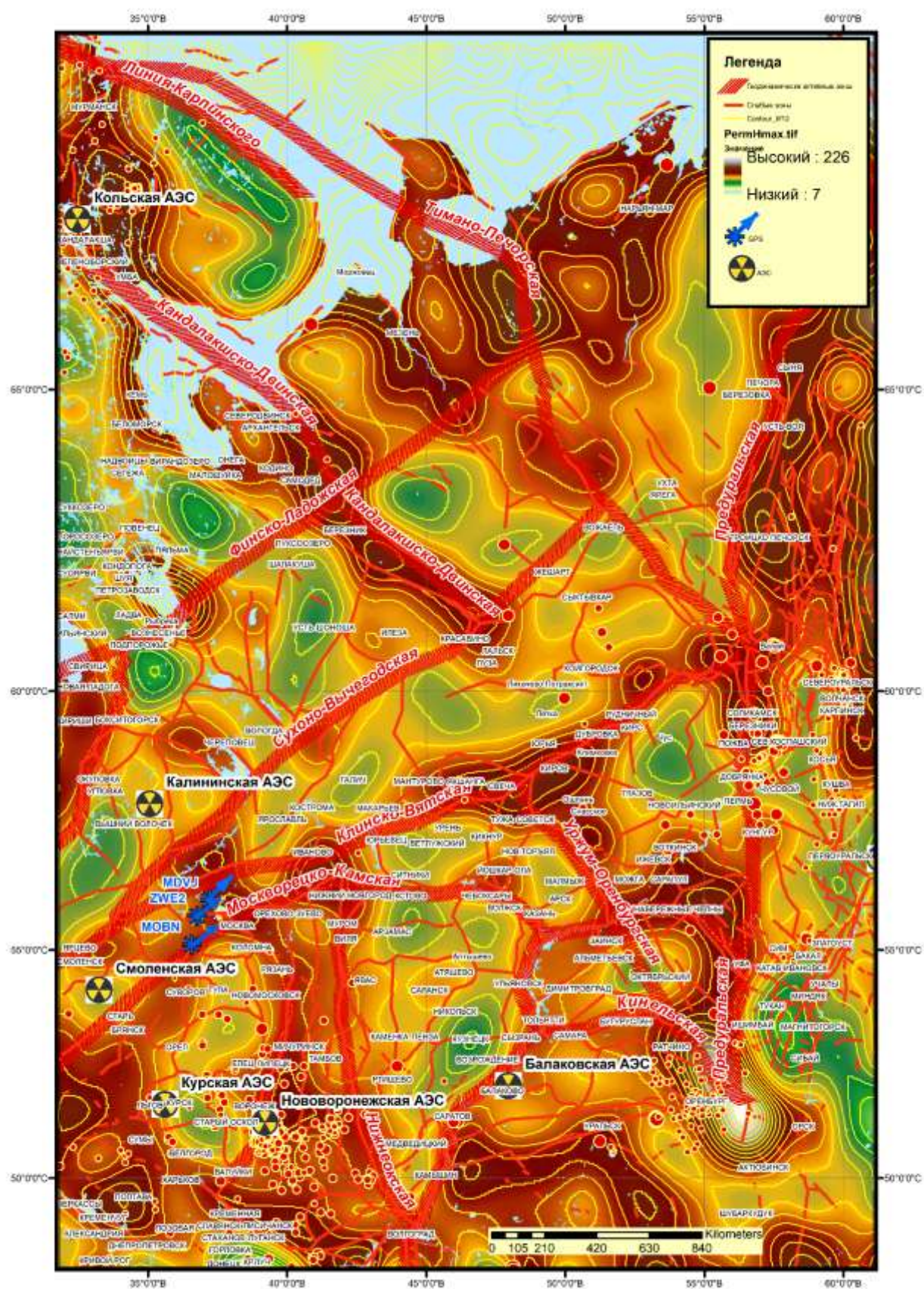


Рисунок 1.2.8. Карта вторичной проницаемости, построенная по шести геодинамическим параметрам для Восточно-Европейской платформы

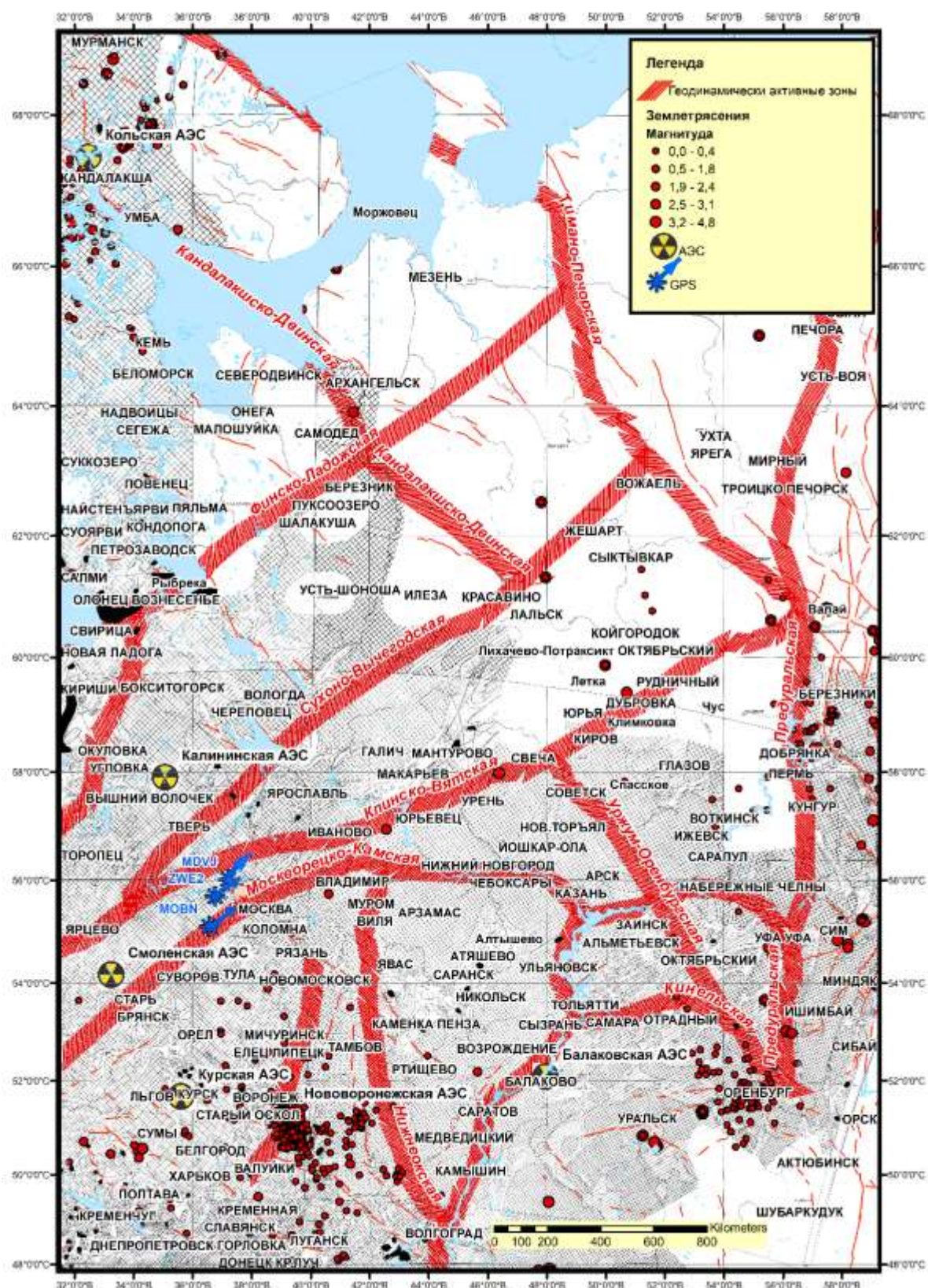


Рисунок 1.2.9. Схема проницаемости земной коры Европейской части СССР. По данным гелиевых исследований (редактор А.Н. Еремеев, 1983) с моделью вторичной проницаемости

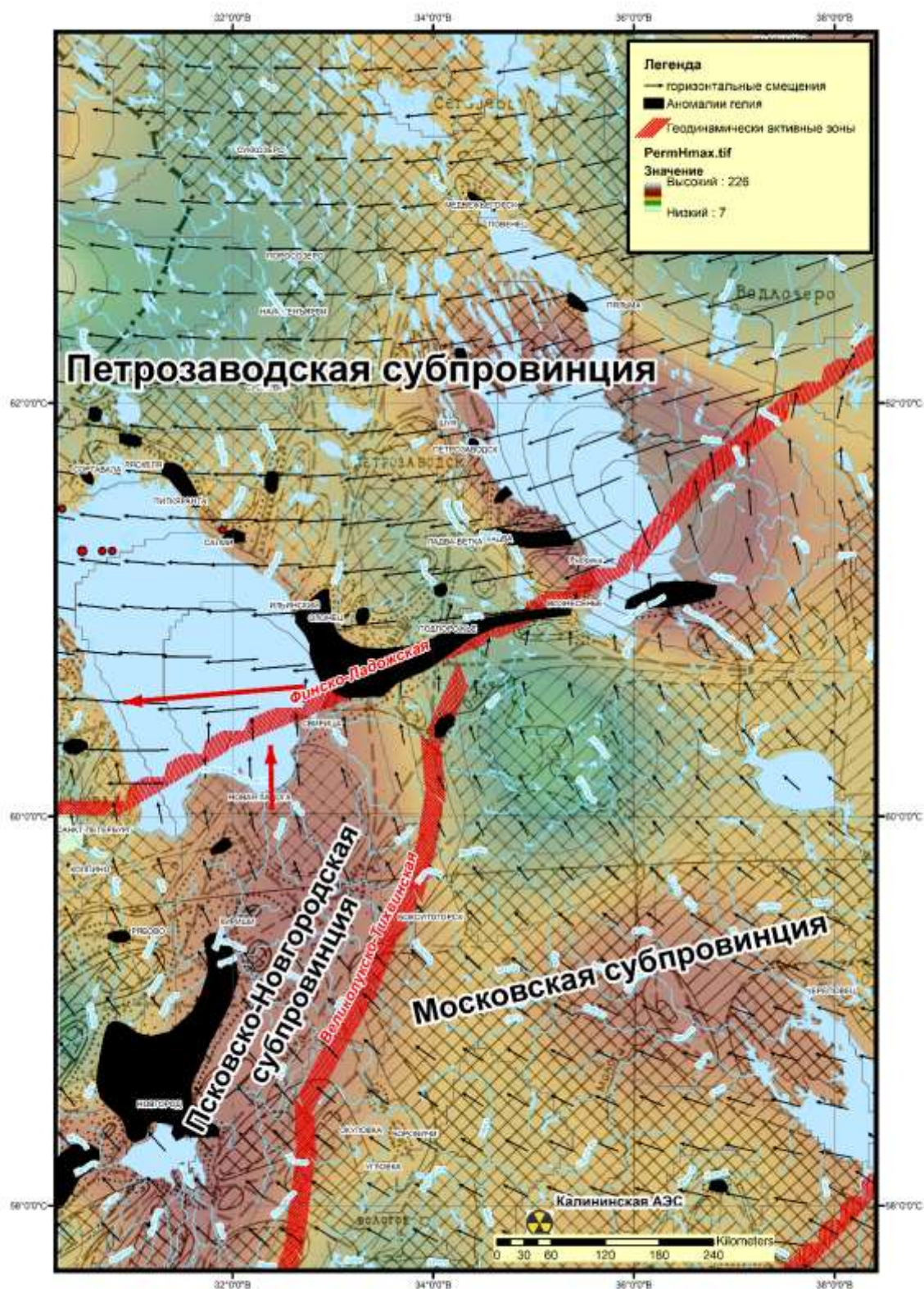


Рисунок 1.2.10. Детальная прогнозная схема проницаемости, построенная по шести геодинамическим параметрам для Петрозаводской субпровинции

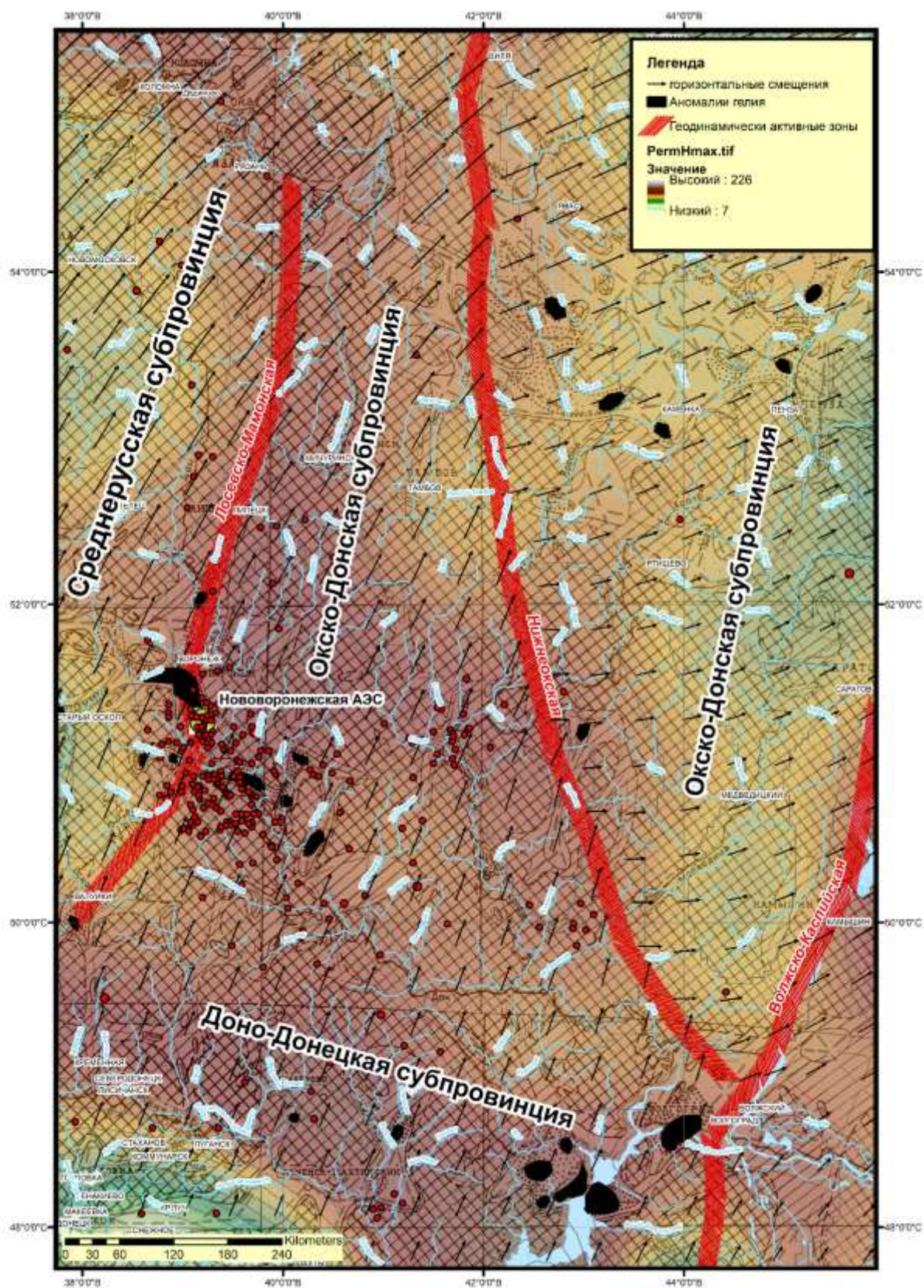


Рисунок 1.2.11. Детальная прогнозная схема проницаемости, построенная по шести геодинамическим параметрам для Доно-Донецкой субпровинции

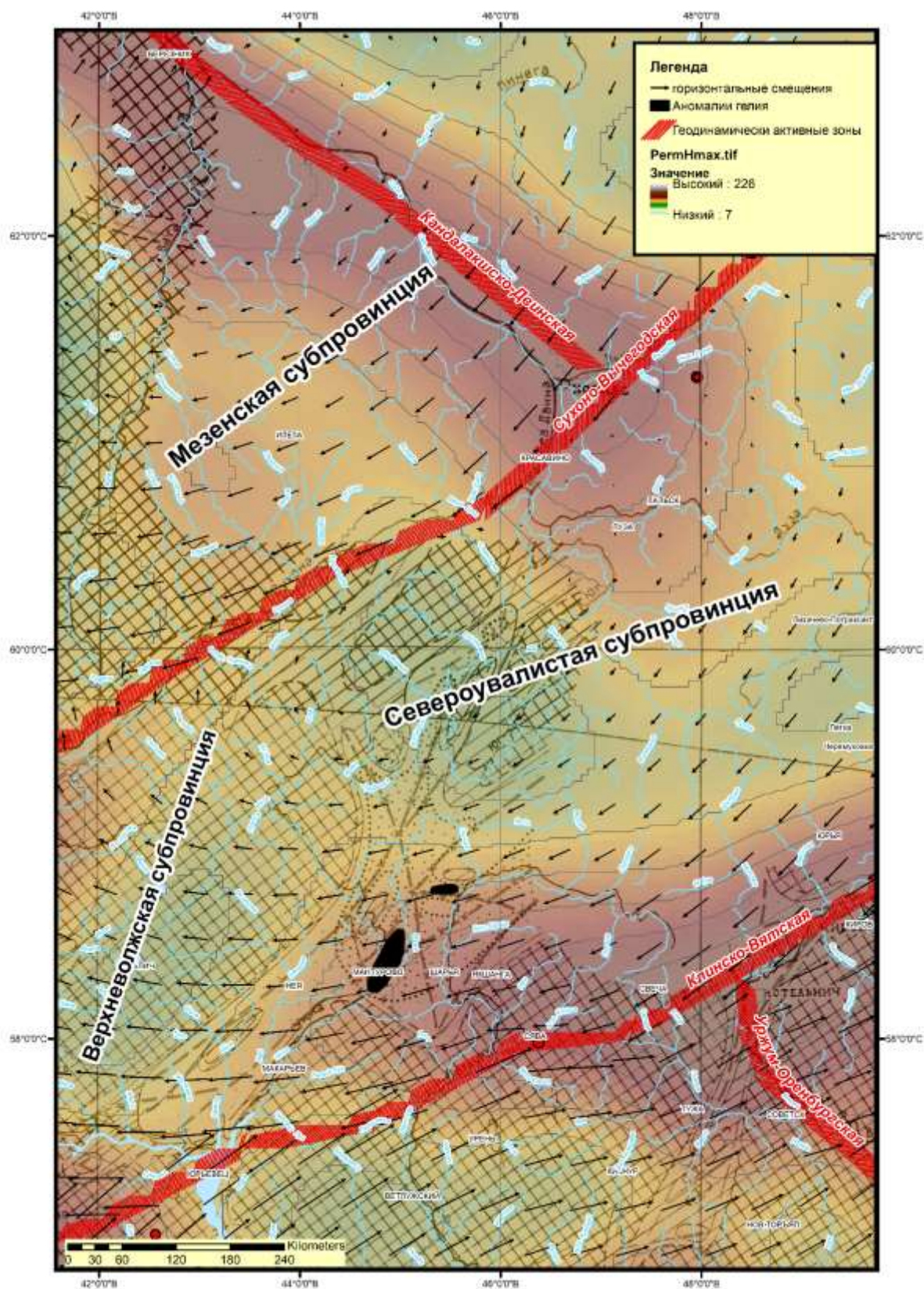


Рисунок 1.2.12. Детальная прогнозная схема проницаемости, построенная по шести геодинамическим параметрам для Верхневолжской субпровинции

1.3. Детальное трёхмерное моделирование новейшей геодинамики западной части Восточно-Европейской платформы

Атомные электростанции – это источники большого количества электрической энергии. Поэтому обеспечение безопасности станций является приоритетным направлением для успешного развития атомной энергетики. При анализе рельефа с помощью структурно-геоморфологического анализа выделены поверхности выравнивания, слабые зоны, часть которых переведена в ранг малоамплитудных разрывных нарушений. Выявленные разрывы на поверхности фундамента и в современном рельефе позволили построить каркас трёхмерной компьютерной геодинамической модели, созданной с помощью программного обеспечения Roxar RMS 2013. Помимо этих параметров в данной модели задана определенная ориентировка и кинематический тип внешней нагрузки. Как результат, получены параметры, которые позволили определить, что Нововоронежская атомная станция находится в небезопасном районе с точки зрения новейшей геодинамики в отличие от Курской и Смоленской атомных станций. Также с помощью моделирования проинтерпретированы геодинамические обстановки в радиусе 150 км вокруг станций, а также описана кинематика новейших разрывов.

На исследуемой западной части Восточно-Европейской платформы находится 3 атомных электростанции (АЭС): Смоленская, Курская, Нововоронежская (далее СМАЭС, КАЭС, НОВАЭС соответственно). Эта территория считается устойчивой, однако зарегистрированные на Воронежской антеклизе местной сейсмической сетью землетрясения с магнитудой больше 4 опровергают эту информацию. В связи с этим рядом организаций и ученых были проведены исследования в области новейшей геодинамики и инженерной геологии. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук исследовал Восточно-Европейскую платформу в рамках различных договоров, таких как: подготовка к продлению срока эксплуатации энергоблоков АЭС, уточнение и обоснование оценок сейсмичности промплощадок энергоблоков АЭС. Эта же организация составила карты детального сейсмического районирования Европейской части России и Урала для действующих, строящихся и проектируемых АЭС. Учеными в различных районах исследуемой территории проводились работы по структурно-геоморфологическому анализу, трёхмерному геодинамическому моделированию, изучению неотектонических структур.

Исследования в области оценки устойчивости расположения атомных станций ведутся авторами работы не первый год. В 2022 году были проведены работы по структурно-геоморфологическому и морфометрическому анализу в 1:100000 масштабе, а

также смоделировано современное напряженное состояние территории вокруг СМАЭС. В результате изучения полученных данных оказалось, что СМАЭС располагается в опасном районе с точки зрения новейшей геодинамики, поскольку станция находится в области образования разрывов малой амплитуды, нарушающих чехол Восточно-Европейской платформы, и вероятность их образования относительно высокая. А будущая область размещения СМАЭС-2 безопасна [Иванов, 2022]. Поэтому возник вопрос о безопасности с точки зрения новейшей геодинамики близко расположенных к СМАЭС атомных станций: Курской и Нововоронежской. В связи с этим было проведено цифровое геологическое моделирование западной части Восточно-Европейской платформы с целью выявления новейших движений, проявляющихся в результате землетрясений, крипа в районах размещения объектов атомной энергетики.

Основной целью работы является выявление геодинамически опасных с точки зрения новейших движений районов западной части Восточно-Европейской платформы вокруг СМАЭС, КАЭС, НовАЭС.

С геологической точки зрения данный район интересен тем, что в его центральной части, где находится Воронежская антеклиза, фундамент которой залегает очень близко к поверхности (первая сотня метров) в отличие от большей части платформы, на которой по данным скважин фундамент вскрывается на глубине более 1 км.

Изучая современное состояние тектонической активности этого региона, были проанализированы результаты ГНСС, каталоги землетрясений, карта проницаемости земной коры (рисунк1.3.1). На исследуемой территории, в Московской и Калужской областях, находятся 3 пункта глобальных навигационных систем: MDVJ, ZWE2, MOBN, которые располагаются возле городов Зеленоград, Звенигород и Обнинск соответственно. За последние 20 лет средние показатели станций говорят о горизонтальных перемещениях со скоростью 25.5 мм/год на северо-восток и поднятии от 0,16 до 0,5 мм/год северной части исследуемой территории. На территории Воронежской антеклизы за период с 1998 по 2012 год местной сейсмической сетью было зафиксировано 296 землетрясений, из которых большая часть имела магнитуду от 0 до 1 и только 13 из них - $M > 2.5$. Глубинность очагов землетрясений достигала 30 – 35 км, но в основном это приповерхностные землетрясения (до 10 км) с небольшой магнитудой. По построенному графику повторяемости землетрясений было выявлено, что землетрясения с $M > 4$ происходят раз в 49-50 лет [Панина и др., 2016]. Задокументированные сейсмические события свидетельствуют о неблагоприятной геодинамической обстановке вокруг Нововоронежской станции особенно.

На схеме проявления новейшей активности показана повышенная проницаемость земной коры по данным гелиевой съёмки (рисунк1.3.1). Смоленская станция находится в

малопроницаемой области в отличие от Курской и Нововоронежской. КАЭС расположена во внутриблочной слабопроницаемой зоне и на слабопроницаемом участке разрывного нарушения, что говорит о том, что здесь есть слабоактивные разрывные нарушения.

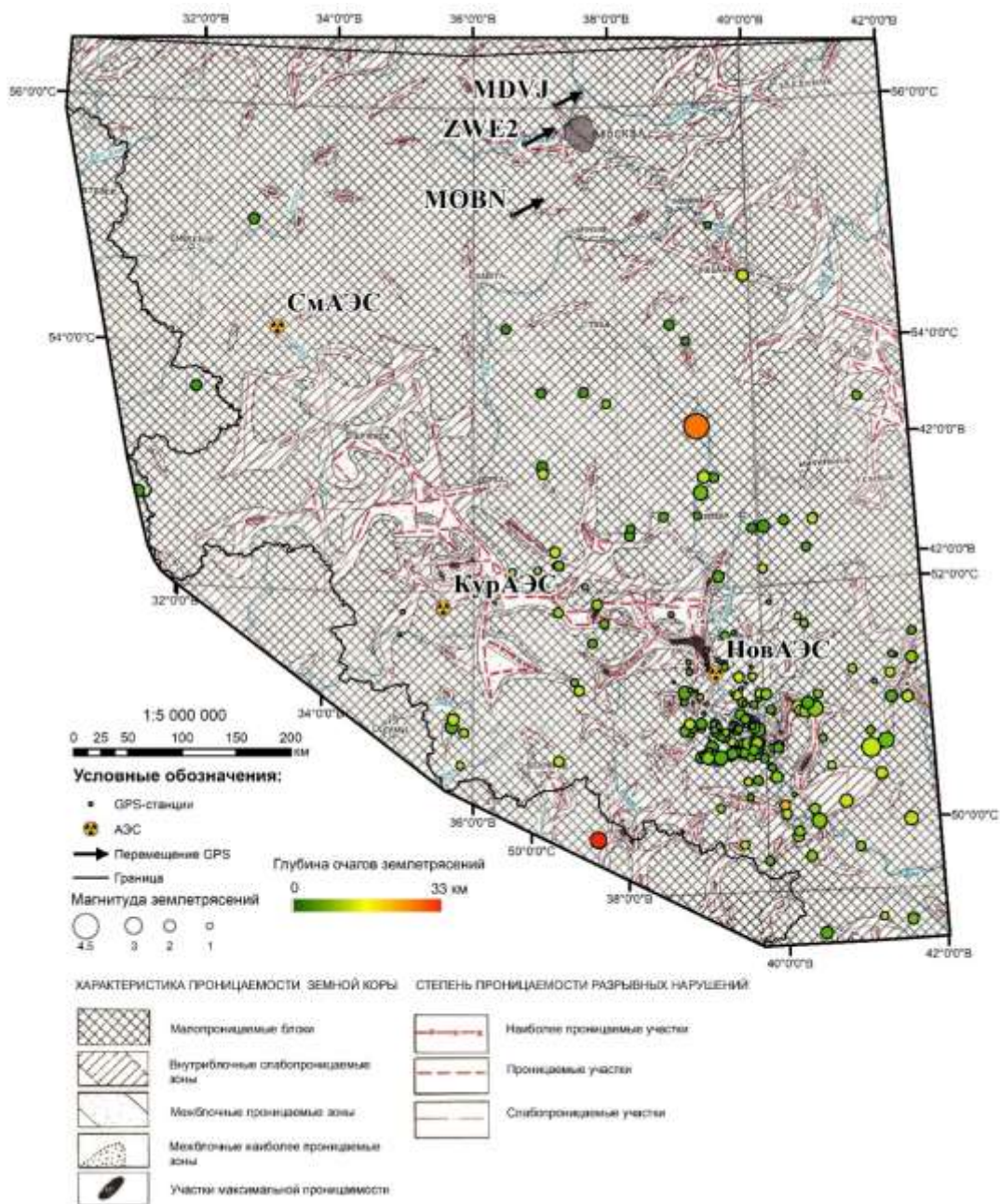


Рисунок 1.3.1. Схема проявления современной активности на исследуемой территории [Еремеев, 1983].

Место расположения НовАЭС находится в межблочной наиболее проницаемой зоне ($\sim 22 \cdot 10^{-4}$ мл/л (по гелию)), что интерпретируется, как активная разломная зона растяжения. Собранные инструментальные данные по землетрясениям и проницаемости земной коры отражают область активно развивающейся современной тектоники на прилегающих к КАЭС и НовАЭС территориях.

С помощью структурно-геоморфологического метода были выделены поднятия и отдешифрированы слабые зоны в масштабе 1:1 000 000, которые представляют собой зоны трещиноватости, дробления пород и разрывов со смещением [Костенко, 1999]. Метод основан на анализе гидросети топографической карты и цифровой модели рельефа FABDEM V 1-0. В результате была построена структурно-геоморфологическая карта (рисунок 1.3.2).

Для анализа структурно-геоморфологической карты была рассчитана плотность выделенных слабых зон, которая показала, что Курская и Нововоронежская станции находятся в регионе повышенных значений этого параметра. Это указывает на более тектонически раздробленную территорию с точки зрения новейшей геодинамики, что неблагоприятно для расположения объектов атомной энергетики. Это же предположение подтверждается с помощью морфометрического анализа, позволившего построить схему вертикального расчленения рельефа и оценить относительную активность неотектонических вертикальных движений. Полученная схема представляет собой результат вычитания максимальной и минимальной отметок высот рельефа, которая приходится на одну ячейку. Сравнение новейших дислокаций, выявленных структурно-геоморфологическим анализом, с древними структурами фундамента [Семенович и др., 1982] показало, что слабые зоны, выраженные в современном рельефе, часто коррелируют с глубинными авлакогенами и грабенами (например, Пачелмским и Подмосковным авлакогенами, Клинцовским грабеном).

Для уточнения контуров и границ отдешифрированных пликативных и дизъюнктивных структур, а также перевода слабых зон в ранг вертикальных разрывных нарушений и определения их амплитуд строились геоморфологические профили. Они закладываются по основным водоразделам исследуемой территории. На профилях выделяются высотные уровни поверхностей выравнивания, каждая из которых имеет свой возраст и соответствующую высоту.

Интерпретация 3-х построенных геоморфологических профилей позволила уточнить границы новейших пликативных (региональных и локальных) и дизъюнктивных структур, а также выделить 7 поверхностей выравнивания: 1 уровень >295 м, 2 уровень ~270 м, 3 уровень ~245 м, 4 уровень ~220 м, 5 уровень ~195 м, 6 уровень ~170 м, 7 уровень ~155 м. По смещению одновозрастных поверхностей выравнивания слабые зоны были переведены в ранг малоамплитудных (амплитуда в среднем до 1-2 м) вертикальных разрывных нарушений.

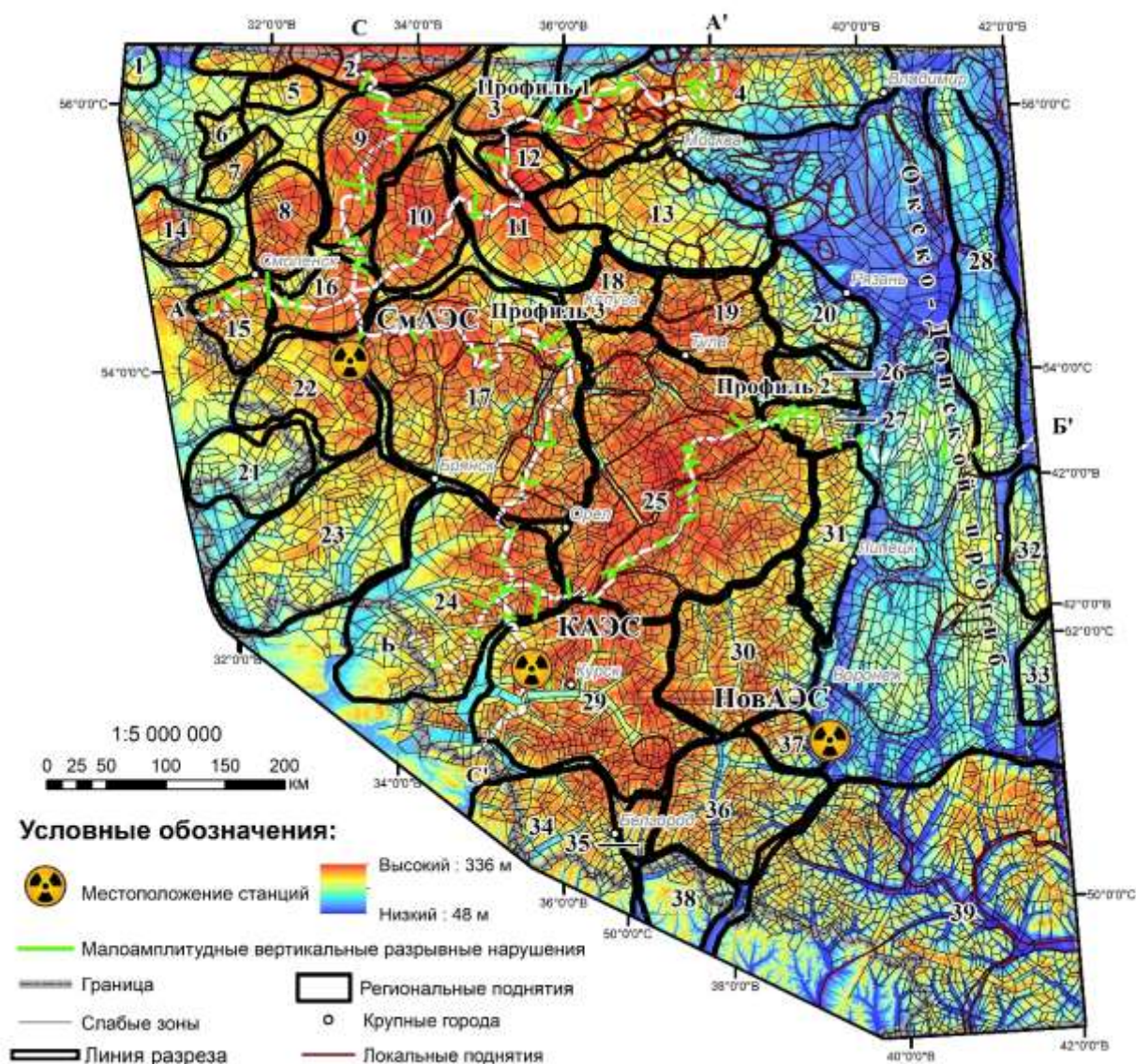


Рисунок 1.3.1. Структурно-геоморфологическая карта западной части Восточно-Европейской платформы. Новейшие региональные поднятия: 1 – Новосокольническое, 2 – Торопецкое, 3 – Старицкое, 4 – Московско-Дмитровское, 5 – Западновинское, 6 – Ильинское, 7 – Пржевальское, 8 – Духовщинское, 9 – Ярцевское, 10 – Вяземское, 11 – Малоярославецкое, 12 – Гагаринское, 13 – Чеховское, 14 – Руднянское, 15 – Смоленское, 16 – Починковское, 17 – Кировское, 18 – Калужское, 19 – Веневское, 20 – Зарайское, 21 – Стародубское, 22 – Рославльское, 23 – Клинцовское, 24 – Железногорское, 25 – Плавское, 26 – Голдинское, 27 – Милославское, 28 – Окско-Днинский вал, 29 – Курское, 30 – Олымское, 31 – Липецкое, 32 – Рассказовское, 33 – Грибановское, 34 – Борисовское, 35 – Корочское, 36 – Оскольское, 37 – Кочетовское, 38 – Шебекинское, 39 – Белогорско-Калачское

Также на профилях показаны возраст и генезис новейших структур по данным четвертичных карт Государственной геологической карты миллионного масштаба [Лаврович и др., 2011; Максимов и др., 2011].

Далее с помощью программного обеспечения Igar RMS 2013 была построена трёхмерная геологическая модель, в основу которой положены следующие данные: поверхность фундамента; рельеф дневной поверхности; вертикальные малоамплитудные

разрывные нарушения и наиболее ярко выраженные в рельефе слабые зоны. Для того, чтобы получить определенные геодинамические параметры: максимальное напряжение, вероятность образования и области распространения разрывных нарушений малой амплитуды, а также относительные амплитуды горизонтальных и вертикальных движений по разломам в исследуемом регионе выбрано региональное сдвиговое поле с горизонтальной ориентировкой оси максимального сжатия 337.5 градусов, которое было определено ранее А.А. Сенцовым (Сенцов,2022). На карте параметра «область распространения разрывов малой амплитуды» НовАЭС находится в опасном районе в отличии от КАЭС и СМАЭС (рисунок 1.3.3).

Поскольку рассчитать абсолютную величину неотектонической нагрузки не представляется возможным, то в результате моделирования были выявлены относительные значения поля деформаций. Естественно при моделировании делаются некоторые допущения: модель состоит из упругого однородного материала; разрывные нарушения должны быть спрямленными и не пересекаться; напряжение оси σ_2 равно среднему напряжению σ_m ; одно из трёх главных напряжений действует вертикально; перемещение по разрывам происходят после полной релаксации напряжений. Расчет таких параметров, как максимальное напряжение, вероятность образования и область распространения разрывных нарушений малой протяженности, осуществляется по закон Кулона-Мора – основному закону, описывающему зависимость касательных напряжений от приложенного нормального напряжения. Он используется для подсчета перераспределения нормального (σ) и касательного (τ) напряжений, ведущего к нарушению прочности пород, при заданной величине внешней нагрузки, достаточной для возникновения новых разрывных нарушений малой протяженности [Руководство,2012]:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C, \text{ где } \varphi - \text{угол внутреннего трения, } C - \text{сцепление.}$$

Расчет параметров перемещения по разрывным нарушениям (неоднородностям) осуществляется методом Displacement Discontinuity.

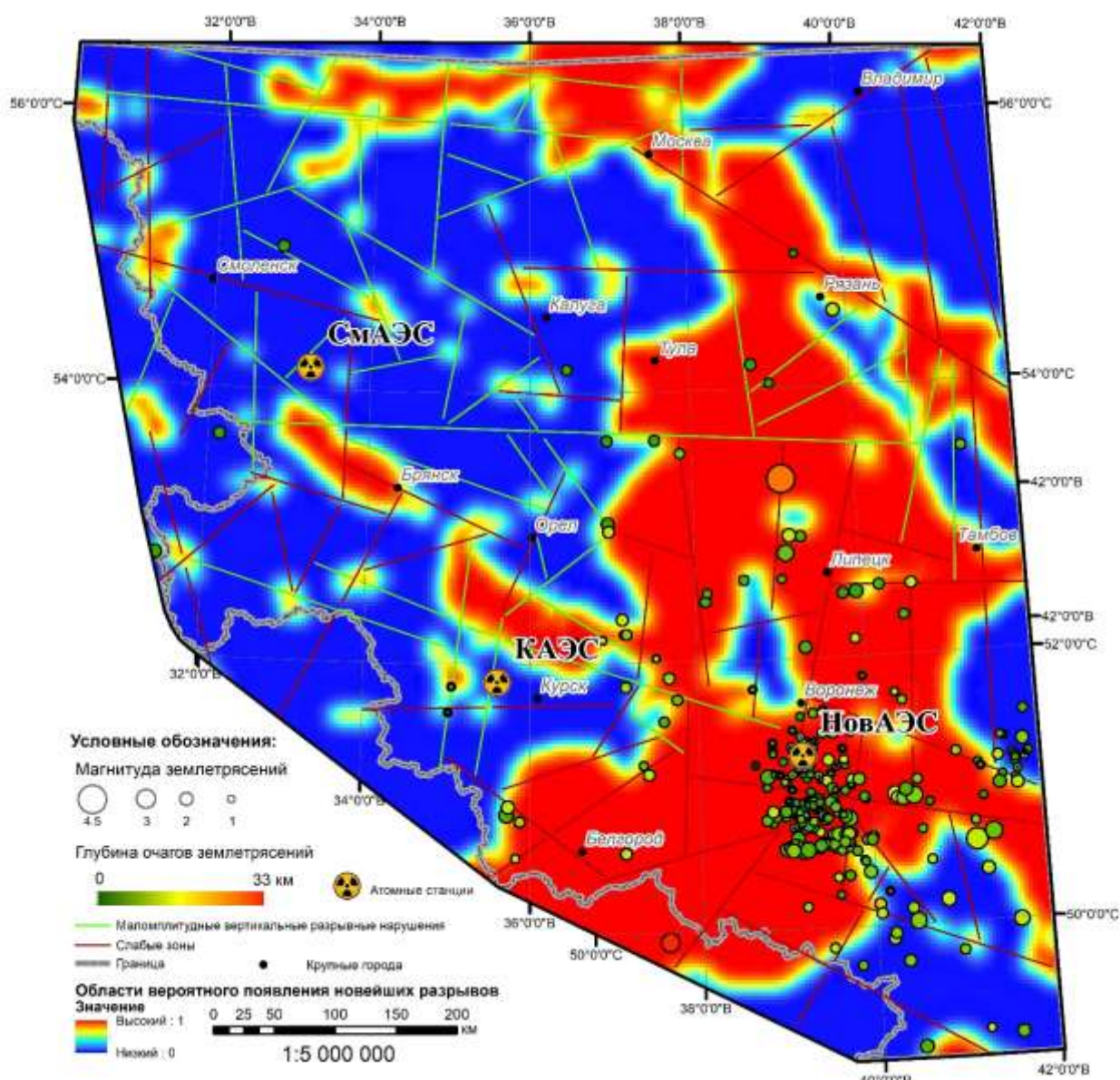


Рисунок 1.3.2. Карта параметра «Области вероятного проявления новейших разрывов»

С помощью данного алгоритма был выполнен расчет величины смещения по разрывам методом граничных элементов, основной целью которого является подсчет перемещения сегмента разлома с помощью решения дифференциальных уравнений [Руководство, 2012]. Таким образом, можно получить горизонтальные и вертикальные составляющие новейших тектонических движений в любой точке исследуемой территории, в отличие от прямых наблюдений GPS. Для подтверждения достоверности полученных результатов было выполнено сравнение расчетных показателей горизонтальных перемещений по методу Displacement Discontinuity с реальными данными GPS-станций (рисунок 1.3.4.). Ориентировка смещений по двум станции MOBN и ZWE-2 оказались близки с результатами, полученных методом Displacement Discontinuity.

С помощью горизонтальных и вертикальных перемещений можно также проводить геодинамическую интерпретацию. Так были проанализированы районы радиусом 150 км вокруг атомных станций, в которых была задана кинематическая интерпретация малоамплитудных вертикальных разрывных нарушений, выделенных при структурно-геоморфологическом анализе. Территория вокруг Смоленской станции расположена в геодинамической обстановке растяжения (рисунок 1.3.5.), Курской станции – в зоне сжатия (рисунок 1.3.6.). А Нововоронежская станция находится в зоне транстенсии (рисунок 1.3.7.), что подтверждается полевыми геофизическими исследованиями в работе Сухановой Т.В. и ее коллег [Суханова и др., 2022], а также большой гелиевой аномалией вокруг места расположения станции.

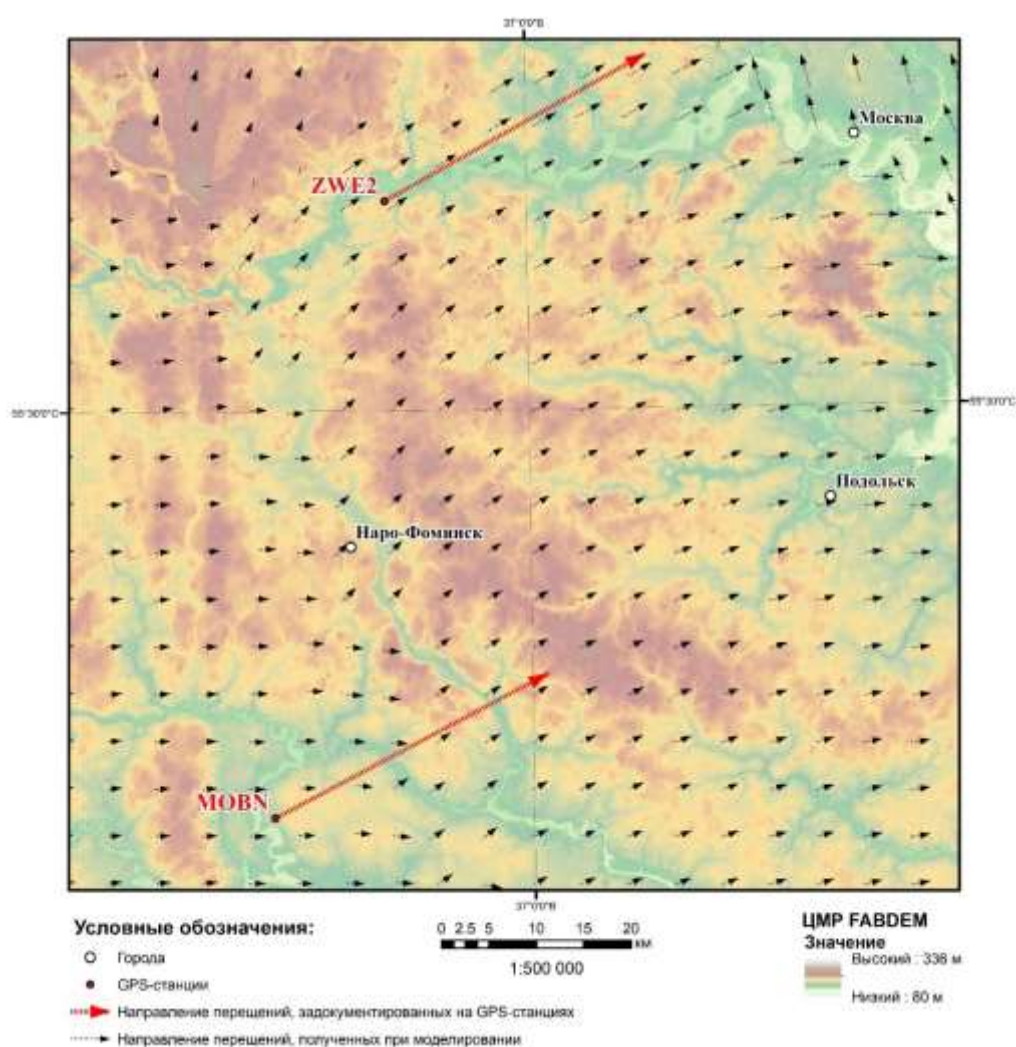


Рисунок 1.3.4. Сопоставление результатов моделирования, полученных с помощью метода *Displacement Discontinuity*, и данных о перемещениях GPS-станций

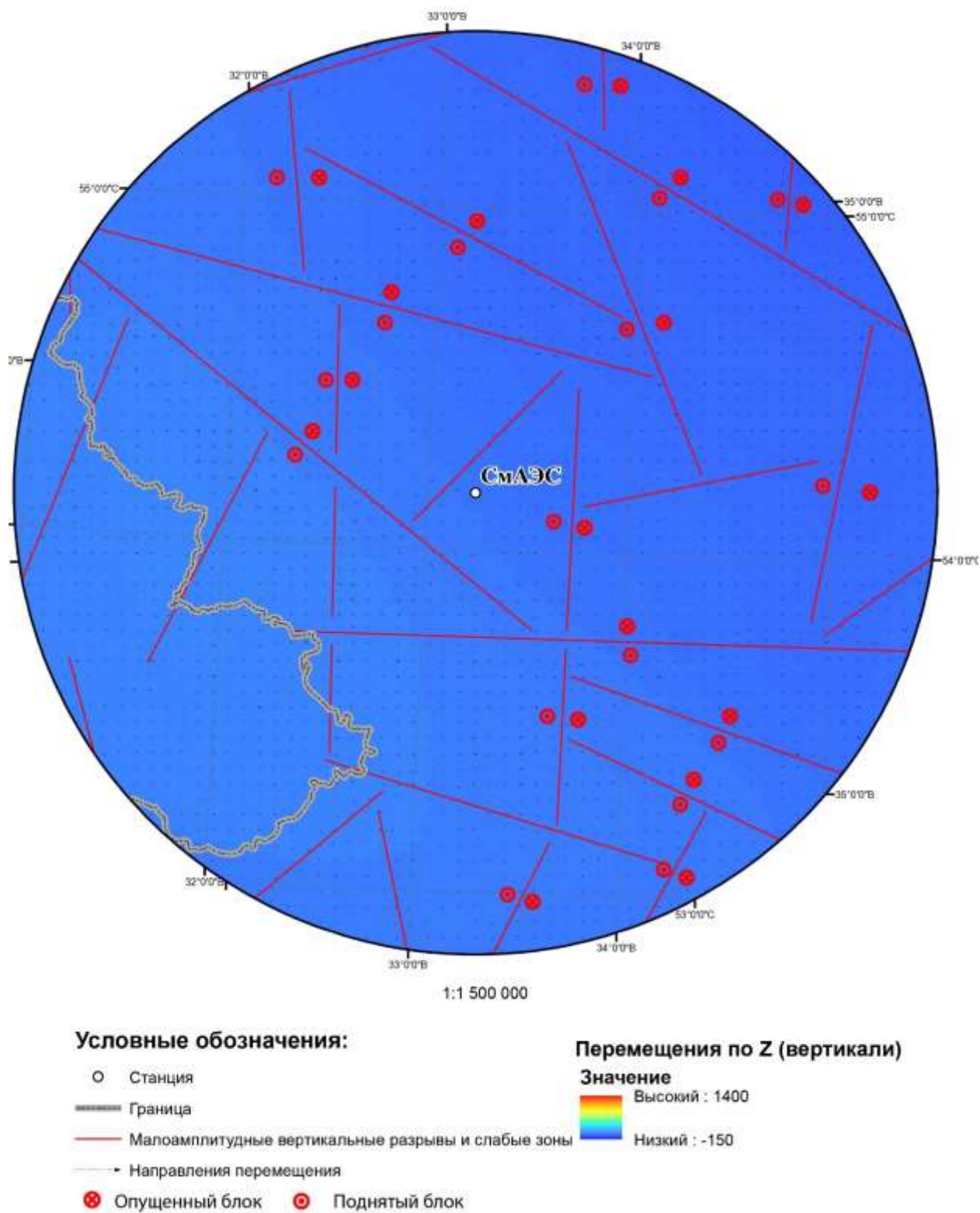


Рисунок 1.3.5. Интерпретация геодинамической обстановки и кинематики разрывных нарушений в районе СмАЭС

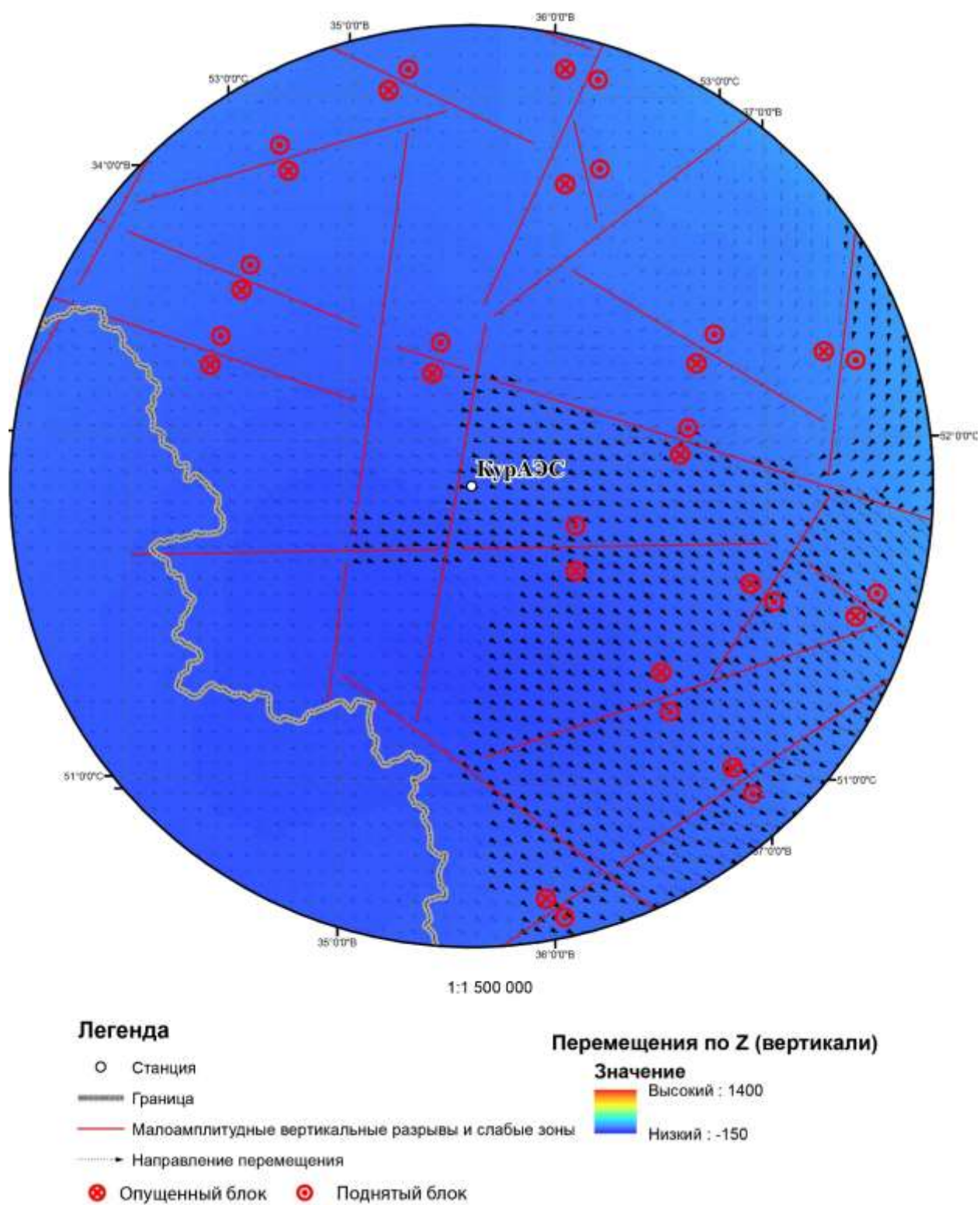


Рисунок 1.3.6. Интерпретация геодинамической обстановки и кинематики разрывных нарушений в районе КАЭС

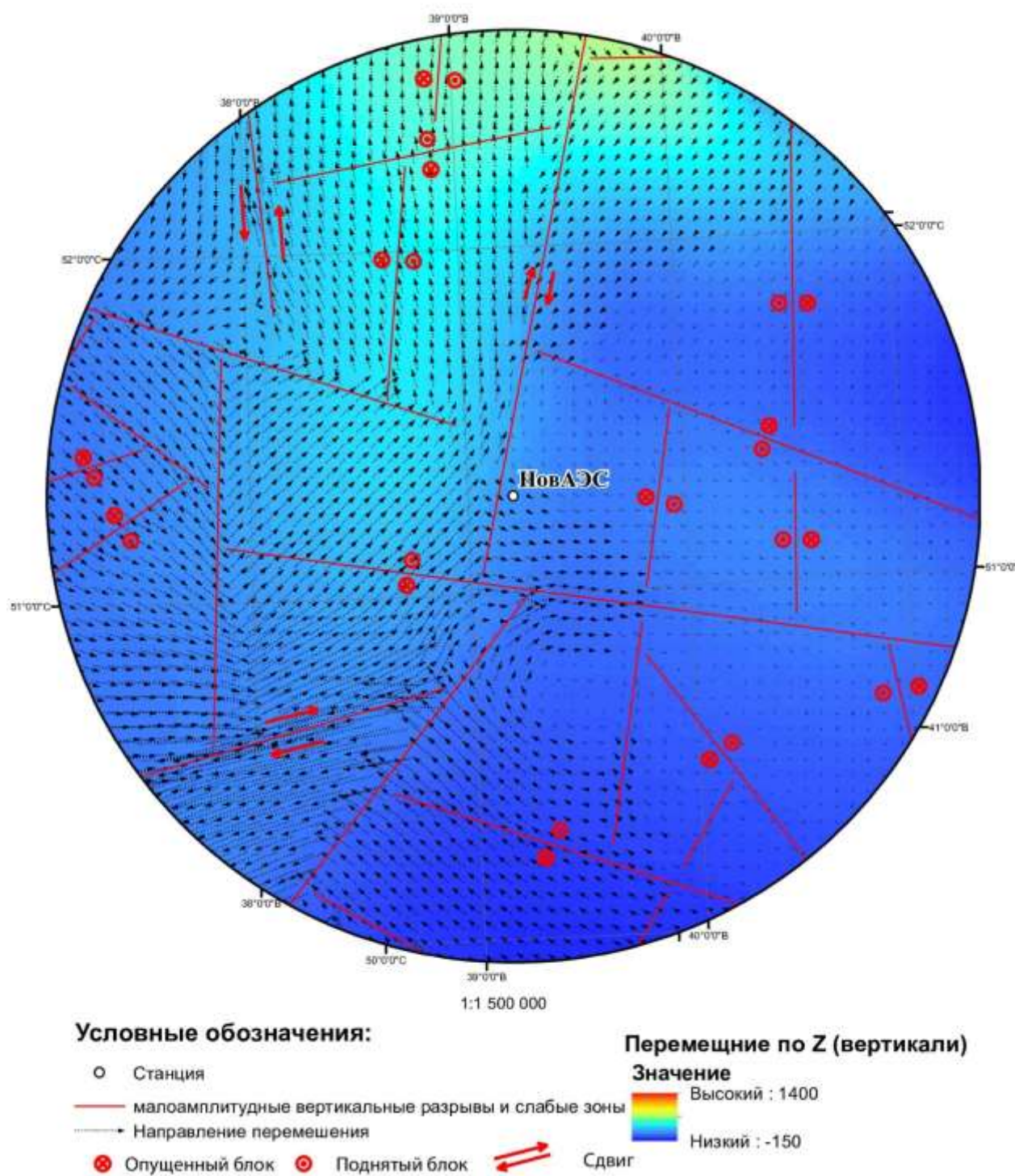


Рисунок 1.3.7. Интерпретация геодинамической обстановки и кинематики разрывных нарушений в районе НовАЭС

Таким образом, комплексный анализ территорий вокруг атомных станций показал, что Нововоронежская атомная станция находится в небезопасном районе с точки зрения новейшей геодинамики, потому что там зафиксировано большое количество малоамплитудных землетрясений, крупные гелиевые аномалии, наблюдаются высокие значения вертикального расчленения рельефа, повышенные плотности слабых зон. Кроме

того, станция находится в области образования разрывов малой амплитуды и вблизи малоамплитудных вертикальных разрывных нарушений и разрывов в фундаменте (рисунок 1.3.8.).

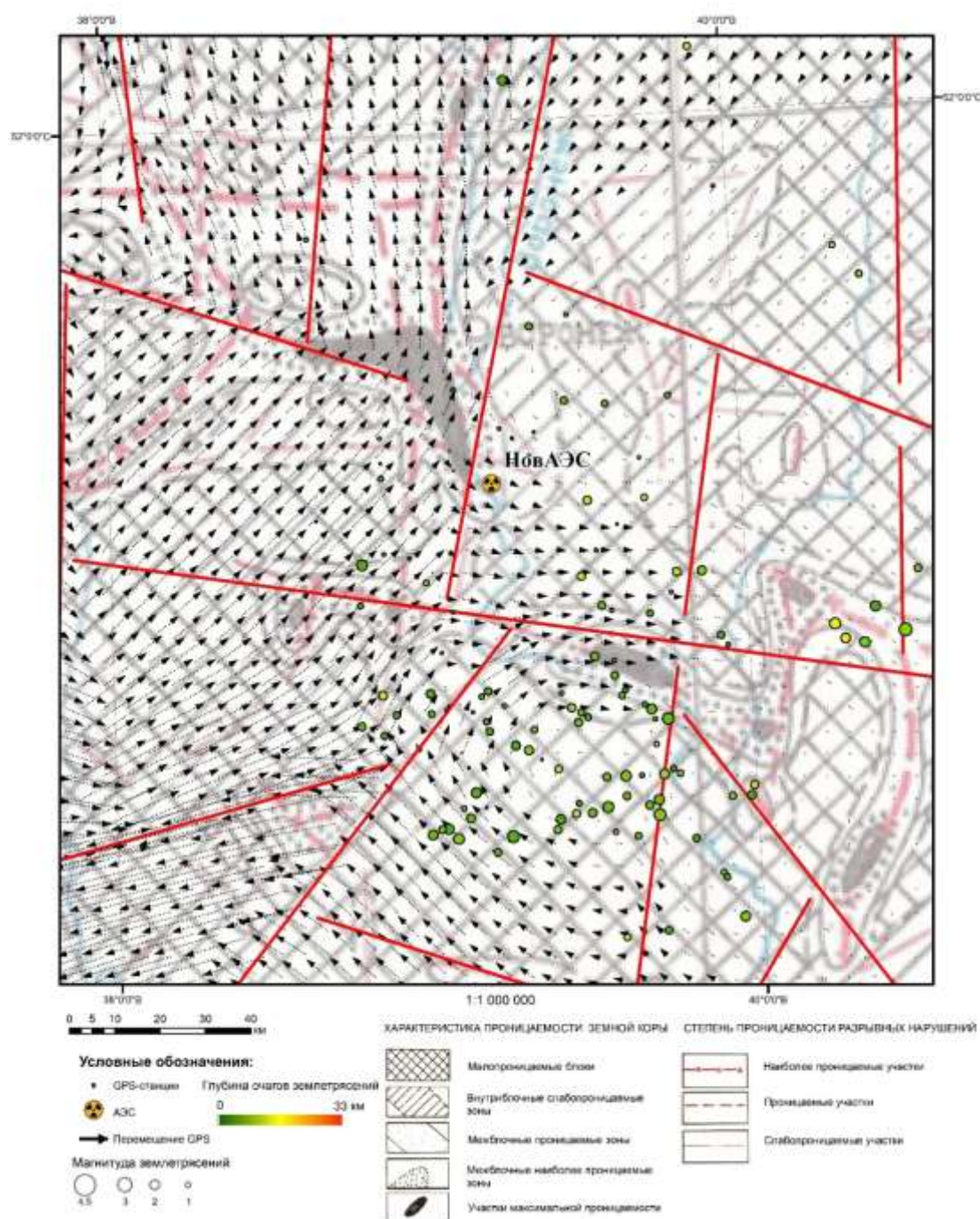


Рисунок 1.3.8. Подтверждение зоны растяжения в районе НовАЭС большой гелиевой аномалией вокруг места расположения станции

В более безопасном по сравнению с НовАЭС находится Курская станция, несмотря на то, что и там фиксируются повышенные значения плотности слабых зон, вертикального

расчленения рельефа и она также находится вблизи малоамплитудного вертикального разрыва. Смоленская станция находится в относительно безопасном геодинамическом районе по сравнению с КАЭС и НовАЭС. На территории станции наблюдаются пониженные значения плотности слабых зон и вертикального расчленения рельефа. Но близость к малоамплитудному вертикальному разрыву и разрыву в фундаменте не позволяет полностью говорить о ее безопасности.

Таким образом, с помощью использования современного программного обеспечения были рассчитаны и показаны новые параметры, позволяющие проводить интерпретацию геодинамической обстановки, определять кинематику разрывов и находить области образования новейших малоамплитудных разрывов.

1.4. Детальная неотектоника и геодинамика Северного Прикаспия

Применение комплексных структурно-геоморфологических исследований, включавших визуальное дешифрирование разномасштабных топографических карт, а также анализ радарных космических изображений и их компьютерную обработку, позволило выявить в пределах Прикаспийской впадины новейшие поднятия и впадины, осложненные линеаментами, многие из которых являются разрывными нарушениями. Новейшие дислокации во многом соответствуют структурам фундамента и осадочного чехла, а также обусловлены «соляной тектоникой». Существенное влияние на их формирование оказывают Уральский ороген и Скифская плита, втянутые на новейшем этапе в общее поднятие.

Район исследования расположен на юго-востоке Русской плиты в пределах Прикаспийской впадины, которая входит в состав единой Каспийской мегавпадины, включающей также впадины Среднего и Южного Каспия. В тектоническом отношении она соответствует одноименной синеклизе Восточно-Европейской платформы – наиболее погруженной по фундаменту структуре. В геоморфологическом отношении Прикаспийская впадина традиционно называется Прикаспийской низменностью, которая испытывала отрицательные движения в течение всего фанерозоя. В современном рельефе – это слаборасчлененная низменная равнина с преобладающими абсолютными отметками менее 100 м вплоть до отрицательных значений -28 м, увеличивающимися к восточной периферии до 200 м и более в области Подуральского плато. На севере и северо-западе пограничными структурами являются новейшие поднятия, которые развиваются на склонах Волго-Уральской и Воронежской антеклиз, на западе и юго-западе – структуры Скифской плиты: Ергенинское поднятие и зона погружения вала Карпинского, на северо-западе – Приволжское поднятие. Северо-восточным обрамлением служит поднятие Общего Сырта, а восточным – структуры предгорного прогиба Уральского орогена. На юге низменность ограничена впадиной Каспийского моря.

Проведенные структурно-геоморфологические исследования позволили выявить в обрамлении Прикаспийской впадины серию новейших поднятий первого ранга, амплитуда которых колеблется от 150 до 400 м (рисунок 1.4.1).

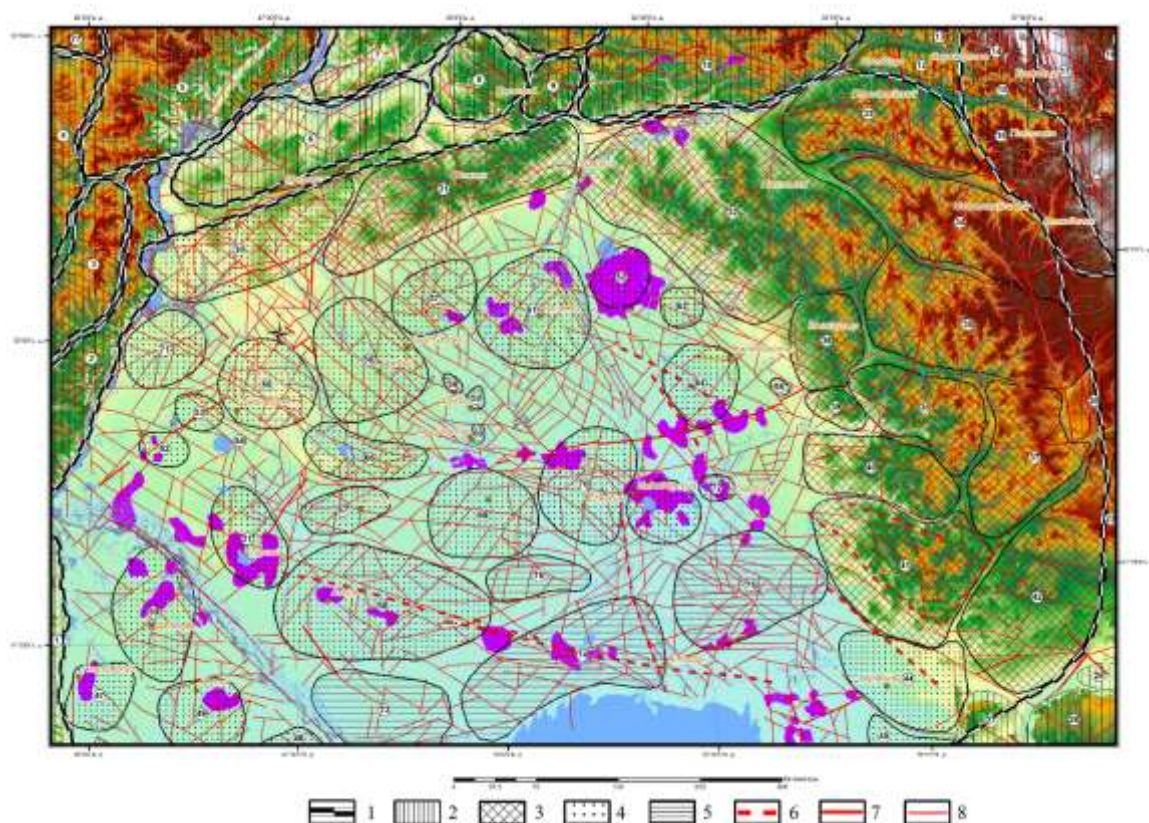


Рисунок 1.4.1. Структурно-геоморфологическая карта Прикаспийской впадины и ее обрамления: 1 — границы структур первого ранга, 2-5 — новейшие поднятия: 2 — первого ранга, 3 — высокоамплитудные, 4 — малоамплитудные, 5 — погребенные; 6 — новейшие разломы, 7 — линеаменты, совпадающие с разломами фундамента, 8 — линеаменты. Цифрами обозначены новейшие поднятия: структуры обрамления Прикаспийской впадины: поднятия первого ранга: с запада: 1 — Ергенинское, 2 — Приволжское; с северо-запада: 3 — Доно-Медведицкое, 4 — Ртищевское, 5 — Саратовское, 6 — Мокроусское, 7 — Каменское; с севера: 7 — Сыртовское, 8 — Перелюбское, 9 — Росташинское, 10 — Сорочинское, 12 — Оренбургское, 13 — Назыкское; с северо-востока и востока: область Предуральяского прогиба: 14 — Чебогаровское, 15 — Кувандыкское, 16 — Полтавское; область южной оконечности Урала: 17 — Новотроицкое, 18 — Ирендыкское, 19 — Алимбетовское; Примугоджарский склон Туранской плиты: 20 — Кумжарганское, 22 — Джурунское; с юго-востока: 23 — Шошкаккольское; 25 — Актумсык, 26 — Донызтаусское, 27 — Жельтаусское, 28 — Турушское, 29 — Коркольское. Поднятия в пределах Прикаспийской впадины: северный склон: 30 — Ахматовское, 31 — Озинкинское, 32 — Долинное, 33 — Первомайское; восточный склон: 34 — Новомихайловское, 35 — Ащикольское, 36 — Акишатаусское, 37 — Енбекское, 38 — Караулкельдинское, 39 — Соркольское, 40 — Коскольское; юго-восточный склон: 41 — Актолагайское; 42 — Жаркамыское, 44 — Мунайлинское, 45 — Опорное; западный и северо-западный склон: 47 — Чкаловское, 48 — Краснопесчаное, 49 — Юстинское, 50 — Джангарское, 51 — Тургайское, 52 — Октябрьское, 53 — Булухтинское, 54 — Эльтонское, 55 — Джаныбекское, 71 — Индерское; центральная часть: 56 — Ажбайское, 57 — Талдыкудукское, 58 — Сатыбалдыкское, 59 — Кожантайское, 60 — Мокринское, 61 — Юлаевское, 62 — Шалкарское, 63 — Булдыртинское, 64 — Калдыгайтинское, 65 — Камыскольское, 66 — Аралсорское, 67 — Аккольское, 68 — Азгирское, 69 — Кусаинское, 70 — Елеусинское, 72 — Карабау, 73 — Астраханское, 74 — Северо-Каспийское, 75 — Сагизское, 76 — Баксайское.

Одни из них развиваются на молодых Скифской и Туранской плитах (Ергенинское, Доништаусское, Турушское и др.); другие на склонах Воронежской и Волго-Уральской антеклиз древней Восточно-Европейской платформы (Приволжское, Мокроусское, Перелюбское, Сорочинское, Назыкское, Оренбургское), третьи образуют систему поднятий в пределах Предуральского прогиба (Чебогаровское, Кувандыкское, Полтавское).

Эти поднятия отделяются друг от друга узкими впадинами, к которым приурочены долины крупных рек. Так, расположенное на северо-востоке Назыкское поднятие (13), граничит на востоке с Инкской предгорной впадиной, разрабатываемой долиной р. Инк. Оренбургское поднятие (12), расположенное на востоке, ограничено с севера и юга соответственно Сакмарской и Уральской приразломными впадинами [Наумов, 1981]. В пределах этих структур первого ранга, испытывающих в целом тенденцию к воздыманию, выделяются частные дислокации.

Сама Прикаспийская впадина также осложнена поднятиями разного ранга и разной амплитуды. Среди них выделяются высокоамплитудные с абсолютными отметками 100-250 м; малоамплитудные, альтитуды рельефа которых не более 100 м, и погребенные, не выраженные в рельефе. Высокоамплитудные поднятия приурочены к северной и восточной перифериям Прикаспийской впадины. Как правило, это несколько вытянутые в субширотном и субмеридиональном направлениях структуры, разделенные узкими долинообразными впадинами, соответствуют относительно приподнятым зонам фундамента: Астраханско-Актюбинской системе поднятий и Заволжско-Предуральской складчатой зоне на востоке и юго-востоке, а также Северо-Западной бортовой зоне на севере. Глубины залегания кровли фундамента здесь колеблются от - 4 до -10 км. Важно отметить увеличение контуров новейших поднятий по сравнению с одноименными структурами фундамента (Ащикольское, Енбекское, Караулкельдинское).

Малоамплитудные (до 100 м) и погребенные поднятия приурочены к центральной западной и южной частям Прикаспийской впадины. Некоторые из них: Мунайлинское (44) и Опорное (45) расположены на юго-востоке. Поднятия, как правило, имеют изометричную форму, обусловленную, по-видимому, соляным диапиризмом. Среди них Чкаловское (47), Юстинское (49), Октябрьское (52), Булухтинское (53), Эльтонское (54), развивающиеся на западном и северо-западном склонах Прикаспия; Юлаевское (61), Шалкарское (62), Булдыртинское (63), приуроченные к центральной части впадины.

Ажбайское (56), Талдыкудукское (57), Сатыбалдыкское (58), Кожантайское (59), Мокринское (60) и др. поднятия развиты в пределах наиболее погруженной по фундаменту (до -22 км) Центрально-Прикаспийской депрессии и являются обращенными структурами. По радарным изображениям на юге Прикаспийской впадины выявлена серия погребенных

поднятий, которая в целом соответствует поднятиям фундамента Астраханско-Актюбинской системы. Расположенные здесь погребенные Астраханское (73), Северо-Каспийское (74) и Сагизское (75) поднятия являются отражением в рельефе положительных структур фундамента, залегающих на глубинах от - 7,5 – 8 км. К ним приурочены соляные диапиры.

Проводилось дешифрирование и линеаментов, которые, как нам представляется, в большинстве случаев имеют тектоническую природу. Преобладающими простираниями линеаментов являются северо-западные, северо-восточные и субмеридиональные. Последние тяготеют к восточной части Прикаспия, так называемому Подуральскому плато. Сравнительно реже проявляются и субширотные направления, как это имеет место в южной и в центральной частях впадины. На востоке доминируют линеаменты субмеридионального простирания. Некоторые из них фрагментарно наследуют разломы фундамента и являются новейшими разломами, выделенными предыдущими исследователями: Азгирский, Жолдыбайский, Эмбенский и др. [Геология., 1970].

Сопоставление новейших структур с глубинными дислокациями указывает на достаточно хорошее их соответствие. Особенно это проявляется при корреляции соляных диапиров, пользующихся широким развитием в Прикаспии. Области солянокупольной тектоники нередко выражены в рельефе новейшими поднятиями, а отдельные диапиры маркируют протяженные линеаменты и новейшие разрывы. Соляными куполами подчеркивается новейший Азгирский разрыв, простирающийся в запад-северо-западном направлении на юге Прикаспийской впадины, а также многие северо-западные линеаменты, отчасти совпадающие с новейшими разрывами. Соляные купола приурочены и к системе протяженных линеаментов субширотного простирания в центральной части Прикаспия. Следует заметить, что эта система фрагментарно наследует глубинный разлом фундамента. Линеаменты северо-восточного простирания также маркируются соляными куполами, особенно на востоке района.

Наблюдается связь соляных диапиров и с новейшими поднятиями. Практически все высокоамплитудные новейшие поднятия восточной периферии Прикаспия, расположены в области развития солянокупольной тектоники. Некоторые из них частично наследуют положительные структуры фундамента, например, Ащикольское, Енбекское, Караулкельдинское, Коскольское. Непосредственно связаны с проявлением диапиризма и малоамплитудные поднятия в центральной части Прикаспия, которые являются обращенными структурами по отношению к фундаменту. Среди них Шалкарское, Юлаевское, Индерское, Сагизское, Эльтонское и др.

Некоторые из выявленных поднятий прослеживаются на структурных картах глубоких горизонтов палеозойских комплексов (верхнедевонском, визейском, башкирском) на глубинах -5-6 км и достаточно хорошо сопоставляются со структурами фундамента. Хорошая корреляция новейших дислокаций с более древними структурами, а именно с девонским комплексом, наблюдается в пределах северной части Прикаспийской впадины. Так, Долинное новейшее поднятие (32), расположенное на севере, наследует такие положительные структурные элементы поверхности девонских отложений, как Карповский структурный нос, Илецкий вал, Уральско-Кобландинскую зону поднятий.

Соотношения новейших поднятий с фундаментом разные. Как правило, наблюдается тенденция расширения контуров новейших поднятий по сравнению со структурами фундамента. Например, Сорочинское новейшее поднятие, обрамляющее Прикаспийскую впадину с севера, наследует Восточно-Оренбургский структурный выступ фундамента в северной части, а на юге представляет собой обращенную структуру по отношению к Бузулукской впадине. Сходную картину можно видеть на востоке Прикаспия, где выраженные в рельефе Ащикольское, Караулкельдинское и Коскольское поднятия с абсолютными отметками 325-100 м лишь в центральных частях отражают одноименные положительные структуры фундамента с отрицательными отметками 7-8 км. Хорошая корреляция новейших структур с фундаментом прослеживается на юге, где Астраханское и Северо-Каспийское погребенные поднятия являются прямым отражением одноименных дислокаций фундамента.

Частично соответствуют разломам фундамента и некоторые линеаменты. Особенно это хорошо прослеживается на периферии Прикаспийской впадины. Все направления линеаментов находят отражение в простираниях глубинных разломов. На востоке – это субмеридиональное, на юго-западе и западе – северо-западное, в центральной части – субширотное, на западе и северо-востоке проявляется северо-восточное простирание. Некоторые протяженные линеаменты фрагментарно частично совпадают с зонами разломов фундамента, установленными геофизическими методами, и являются границами крупных структурных единиц. Так, северная граница Прикаспийской впадины с Восточно-Европейской платформой проходит вдоль линеамента восток-северо-восточного простирания. Южнее, параллельно ему следует разлом фундамента, отделяющий крутой северный склон Прикаспийской впадины от более погруженной по фундаменту Волгоградско-Оренбургской системы моноклиналей, который имеет отражение в рельефе. Выражен в рельефе и разлом северо-западного простирания, отделяющий Прикаспийскую впадину от кряжа Карпинского на юго-западе. К северо-востоку и параллельно ему

дешифрируется протяженный линеамент, следующий вдоль участка долины реки Волги, фрагмент которого также является унаследованным от фундамента.

Долинами рек разрабатываются субмеридиональные разломы фундамента, отделяющие Прикаспийскую впадину от Предуральского прогиба и Примугоджарского склона Туранской плиты на востоке.

Результаты компьютерной обработки радарных изображений с использованием программы LESSA также показали хорошую корреляцию с данными визуального дешифрирования. Многие поднятия рельефа подчеркиваются линиями вытянутости, которые либо оконтуривают их, либо имеют радиально расходящийся рисунок. Эти признаки использовались для выявления малоамплитудных и погребенных структур, которые на обычных топографических картах и снимках дешифрируются с трудом (Мануйлинское, Астраханское, Северо-Каспийское и др.). Линии вытянутости следуют также вдоль протяженных линеаментов, выявленных визуально. На наличие линеамента может указывать изменение их простираний.

Наблюдается и хорошее соответствие между линиями вытянутости и структурными элементами фундамента: изогипсами, разломами. Линии вытянутости нередко следуют вдоль изогипс фундамента, резко изменяют простирания в зонах разломов. На картах фундамента [Международная..., 2003.] хорошо видно, как линии вытянутости изменяют простирания в зонах разломов фундамента или следуют вдоль них (рисунок 1.4.2). Наиболее крупные структуры фундамента, такие как ограничивающий с юго-запада Прикаспийскую впадину, кряж Карпинского подчеркивается линиями вытянутости северо-западного простирания. Отражаются в линиях вытянутости протяженные разломы фундамента северо-западного простирания, которые пересекают впадину на северо-западе, в области пограничной с древним Пачелмским авлакогеном. Одним из них является разлом, совпадающий с участком долины реки Волга. В пределах Астраханского свода, наиболее крупной структуры Прикаспия, линии вытянутости имеют радиально расходящийся рисунок, тем самым подчеркивая его [Панина, Зайцев 2011].

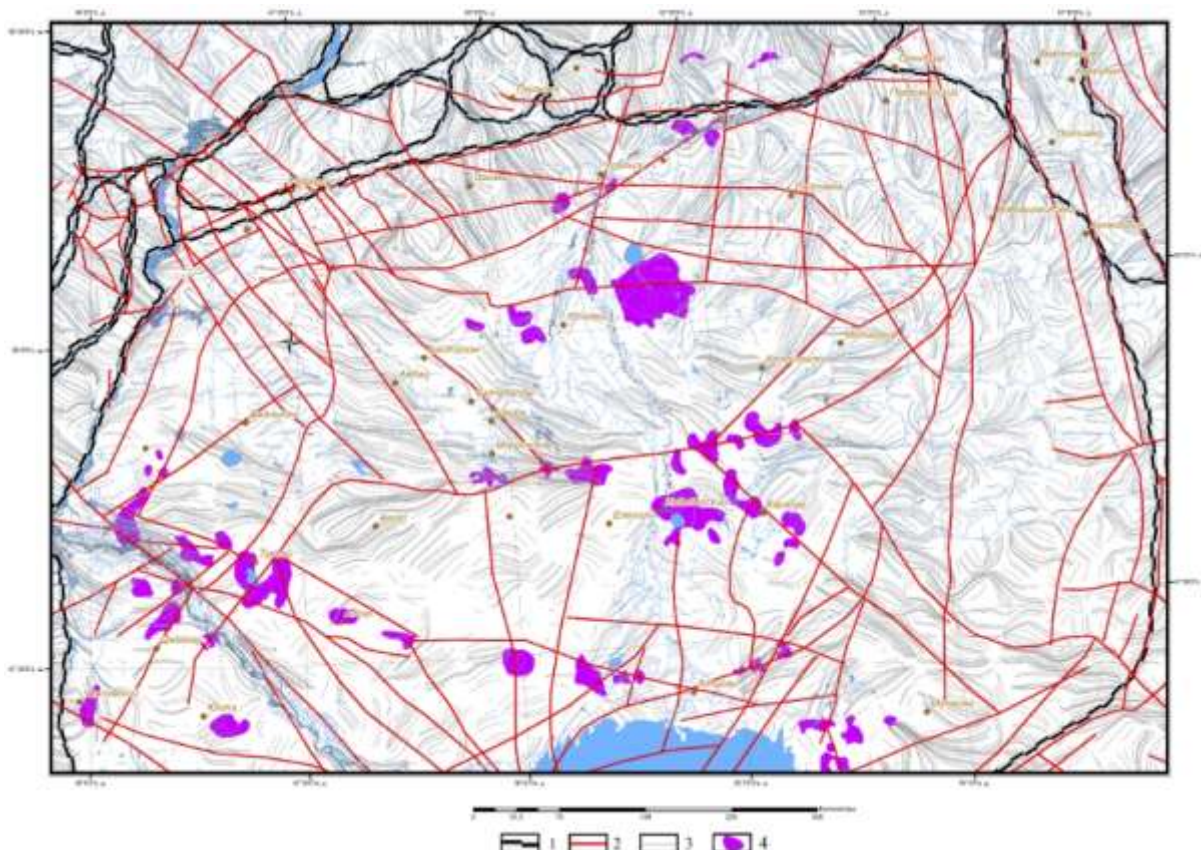


Рисунок 1.4.2. Схема корреляции линий вытянутости роз-диаграмм с разломами фундамента: 1 — границы структур первого ранга, 2 — разломы фундамента, 3 — линии вытянутости роз-диаграмм, 4 — соляные диапиры

В конфигурациях линий вытянутости нашли отражение Северо-Каспийское, Караулкельдинское и др. поднятия фундамента. Резкие изменения простирания линий вытянутости в центральной части Прикаспийской впадины приурочены к зоне субширотного разлома, который отделяет Центрально-Прикаспийский прогиб фундамента от расположенной южнее Северо-Атырауской системы моноклиналей.

Сравнение с гравитационным и магнитным полями показало, что некоторые новейшие поднятия, протяженные линеаменты или их фрагменты находят отражение в магнитных и гравитационных аномалиях (рисунки 1.4.3; 1.4.4).

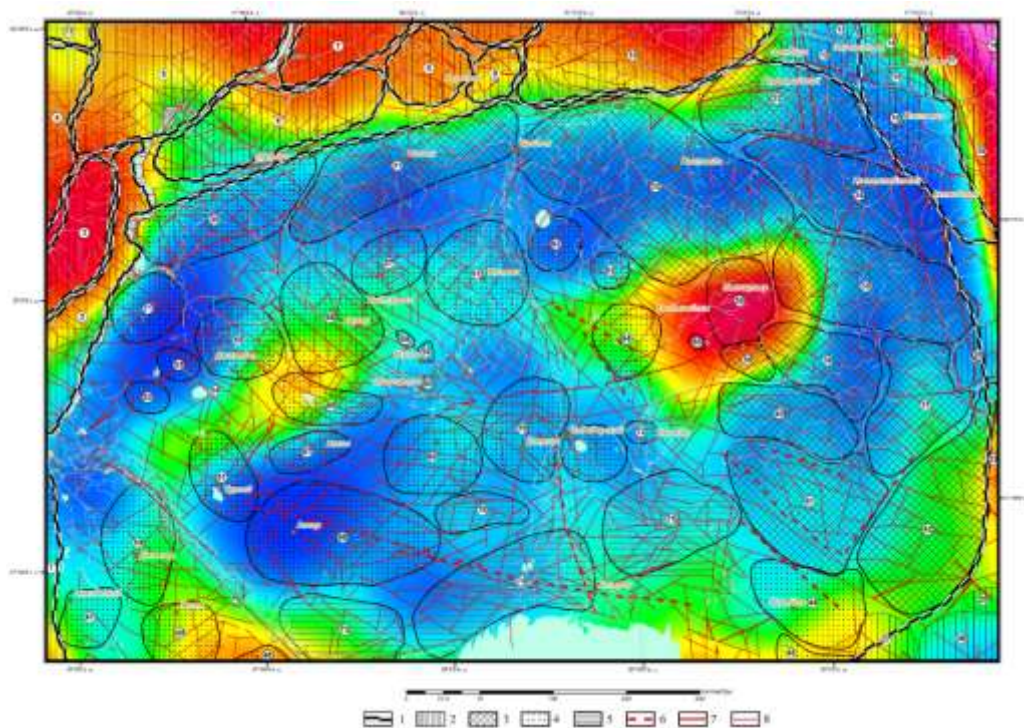


Рисунок 1.4.3. Сопоставление новейших структур с гравитационными аномалиями, полученными с помощью космического аппарата Grace:
 1 — границы структур первого ранга, 2-5 — новейшие поднятия: 2 — первого ранга, 3 — высокоамплитудные, 4 — малоамплитудные, 5 — погребенные; 6 — новейшие разломы, 7 — линеаменты, совпадающие с разломами фундамента, 8 — линеаменты

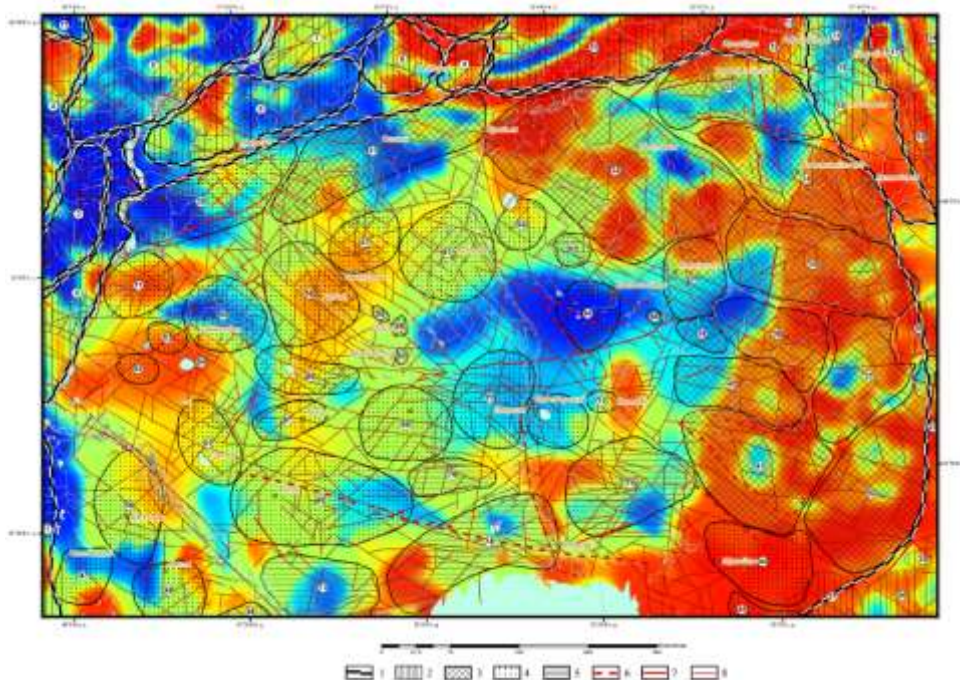


Рисунок 1.4.4. Сопоставление новейших структур с магнитными аномалиями:
 1 — границы структур первого ранга, 2 - 5 — новейшие поднятия: 2 — первого ранга, 3 — высокоамплитудные, 4 — малоамплитудные, 5 — погребенные; 6 — новейшие разломы, 7 — линеаменты, совпадающие с разломами фундамента, 8 — линеаменты

Таким образом, в результате проведенных исследований во многом уточнена новейшая структура Северного Прикаспия. В целом, имеющая прямое соотношение с рельефом фундамента, Прикаспийская впадина осложнена частными поднятиями разного ранга и амплитуды, развивающимися на фоне соляного диапиризма, как правило, обусловленного тектоническими движениями блоков фундамента. Высокоамплитудные поднятия приурочены к восточной периферии Прикаспия, а малоамплитудные и погребенные положительные структуры развиты в центральной области, испытавшей длительное погружение. Рост этих поднятий, сопровождается образованием линеаментов, многие из которых являются плохо выраженными в рельефе разрывами, зонами трещиноватости, дробления пород и др., т.е. имеют тектоническую природу. Преобладающими простираниями линеаментов являются северо-западное, северо-восточное и субмеридиональное (главным образом, на востоке). Линеаменты северо-западного простирания пользуются развитием на юго-западе, северо-западе и западе района. Сравнительно реже встречаются линеаменты субширотного простирания, приуроченные главным образом, к центральной части впадины. Наиболее протяженные из них наследуют разломы фундамента и частично отражаются в гравитационных и магнитных аномалиях. Выявленные новейшие структуры, по-разному коррелируются с глубинными дислокациями. Как правило, наблюдается частичное наследование поверхностными структурами древних комплексов. Особенно хорошее соответствие обнаруживается в периферических частях: в областях сопряжения с Уральским орогеном и Скифской плитой. Характерна тенденция разрастания новейших поднятий по сравнению с глубинными дислокациями.

Формирование новейших структур Прикаспийской впадины происходит под влиянием деформаций фундамента и окружающих ее Уральского орогена и Скифской плиты. Активизация этих крупных систем, начавшаяся, в позднем миоцене (предплиоценовая фаза) привела к формированию новейшего структурного плана Прикаспия. Особенно это ощущается на восточной периферии, где впадина граничит с Предуральским прогибом и его южным продолжением. Именно здесь расположены высокоамплитудные поднятия, которые испытывают устойчивое развитие, начиная с миоцена. Втянутая в поднятие в позднем миоцене и развивающаяся под воздействием Кавказского орогена, Скифская плита, особенно ее главная структура – вал Карпинского, также оказывает влияние на развитие Прикаспия. Построенная компьютерная модель новейших тектонических движений выявила северо-восточный, сходный со Скифской плитой, тренд горизонтальных перемещений (рисунок 1.2.3).

1.5. Неотектоника и геодинамика Волго-Уральской антеклизы (Русская равнина)

В новейшем структурном плане территория Волго-Уральской антеклизы представляет собой сочетание разноранговых поднятий и впадин, осложненных линеаментами и разрывными нарушениями (рисунок 1.5.1). Крупные поднятия Бугульминско-Белебеевское и Общего Сырта (Среднего и Мелового Сырта), в целом характеризуются субширотной ориентировкой и, в свою очередь, включают локальные поднятия четырех простираний – северо-восточного, северо-западного, субмеридионального и субширотного. Поднятия разделены узкими впадинами-долинами и нарушены линеаментами тех же простираний. Линеаменты часто ограничивают поднятия и разделяют блоки рельефа, на которые разбиты пликативные структуры. Отдельные линеаменты и их системы являются отражением в рельефе разломов фундамента преимущественно северо-восточного и северо-западного простирания или являются разрывами, что подтверждено геолого-геофизическими данными, как например, субмеридиональный разлом, разрабатываемый долиной р. Белая и служащий границей Русской равнины и Предуральского прогиба. Комбинация поднятий и линеаментов создают в рельефе сводово-блоковый стиль дислокаций.

Выделенные линеаменты хорошо выражены в линиях вытянутости гидросети, построенных программой Lessa, и следуя вдоль них, отражают доминирующие простирания: северо-восточное, северо-западное и субмеридиональное, а также субширотное (рисунок 1.5.2). Для структур Русской равнины (Общий Сырт), пограничных с Уральским орогеном, характерно преобладание субмеридионального и северо-западного простирания. Севернее, где расположено Бугульминско-Белебеевское поднятие преобладают северо-восточные, реже северо-западные простирания.

Выявленные новейшие дислокации геодинамически активны. С ними часто связаны аномалии гелия и водорода; к перифериям растущих поднятий и некоторым линеаментам приурочены эпицентры землетрясений (рисунок 1.5.3), повышенные значения теплового потока; они контролируют расположение нефтегазовых месторождений. Последние вытянуты вдоль линеаментов северо-восточного простирания, а самое большое Ромашкинское месторождение изометричной формы расположено в сводовой части активно развивающегося Бугульминского поднятия. Некоторые месторождения тяготеют к периферии новейших поднятий (Первомайское, Нефтекамское) (рисунок 1.5.4).

Многие линеаменты и их системы являются отражением в рельефе разломов фундамента, а также являются разрывами, установленными геолого-геофизическим данными. Новейшие поднятия в одних случаях наследуют своды фундамента–Пермско-Башкирский, Южно-Татарский, Оренбургский. В других –соответствуют структурам фундамента частично. Встречаются и обратные соотношения. Прямое соотношение с дислокациями тиманид характерно для локальных поднятий Бугульминско-Белебеевского и расположенного к северо-востоку от него Новотроицко-Урмантского крупных поднятий. Многие линеаменты и их системы коррелируют с глубинными разломами фундамента и тиманид, которыми часто контролируются границы крупных новейших поднятий. В целом, глубинная структура имеет «отклик» в новейших дислокациях.

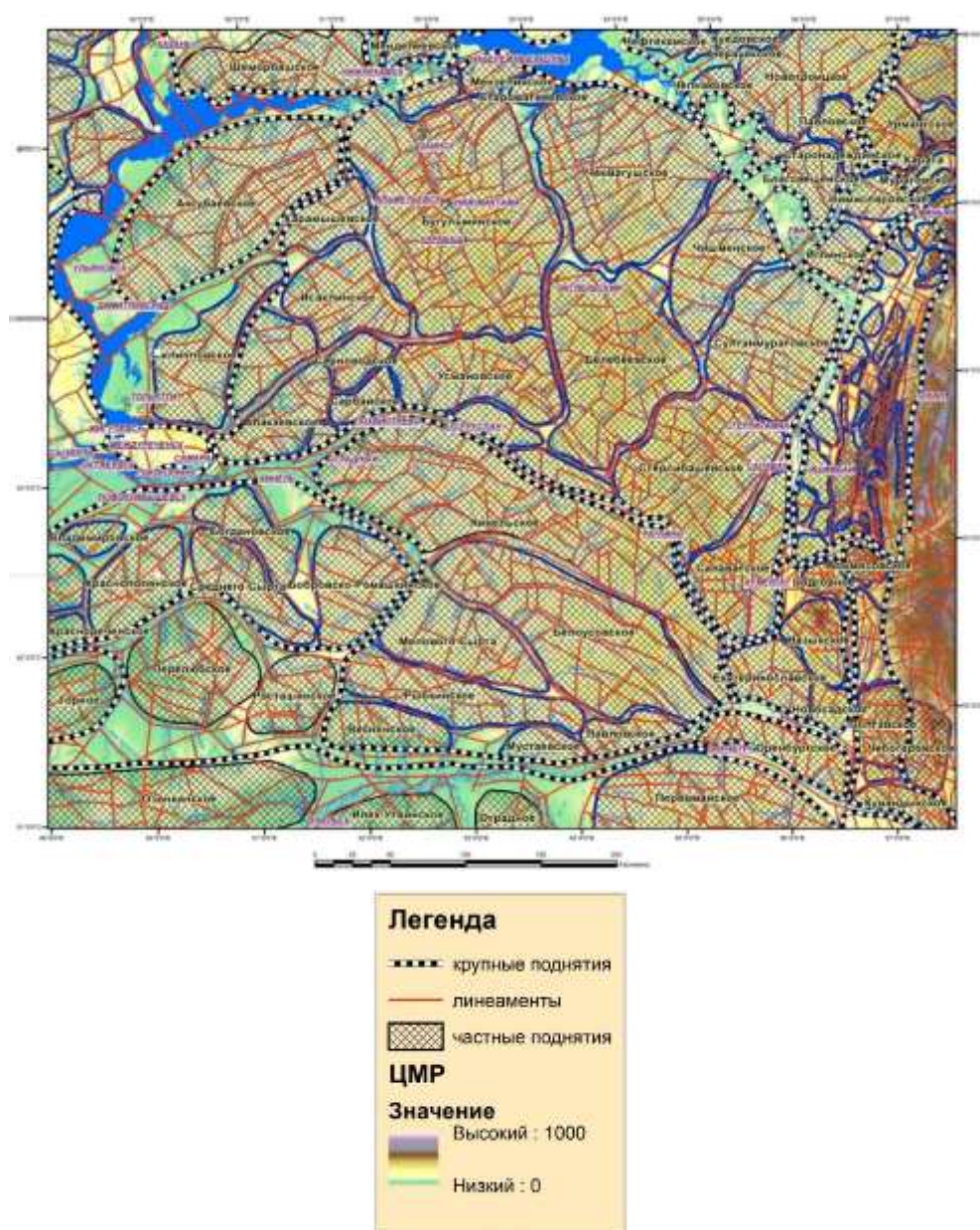


Рисунок 1.5.1. Структурно-геоморфологическая карта юго-восточной части Русской равнины

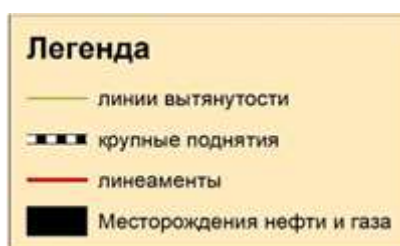
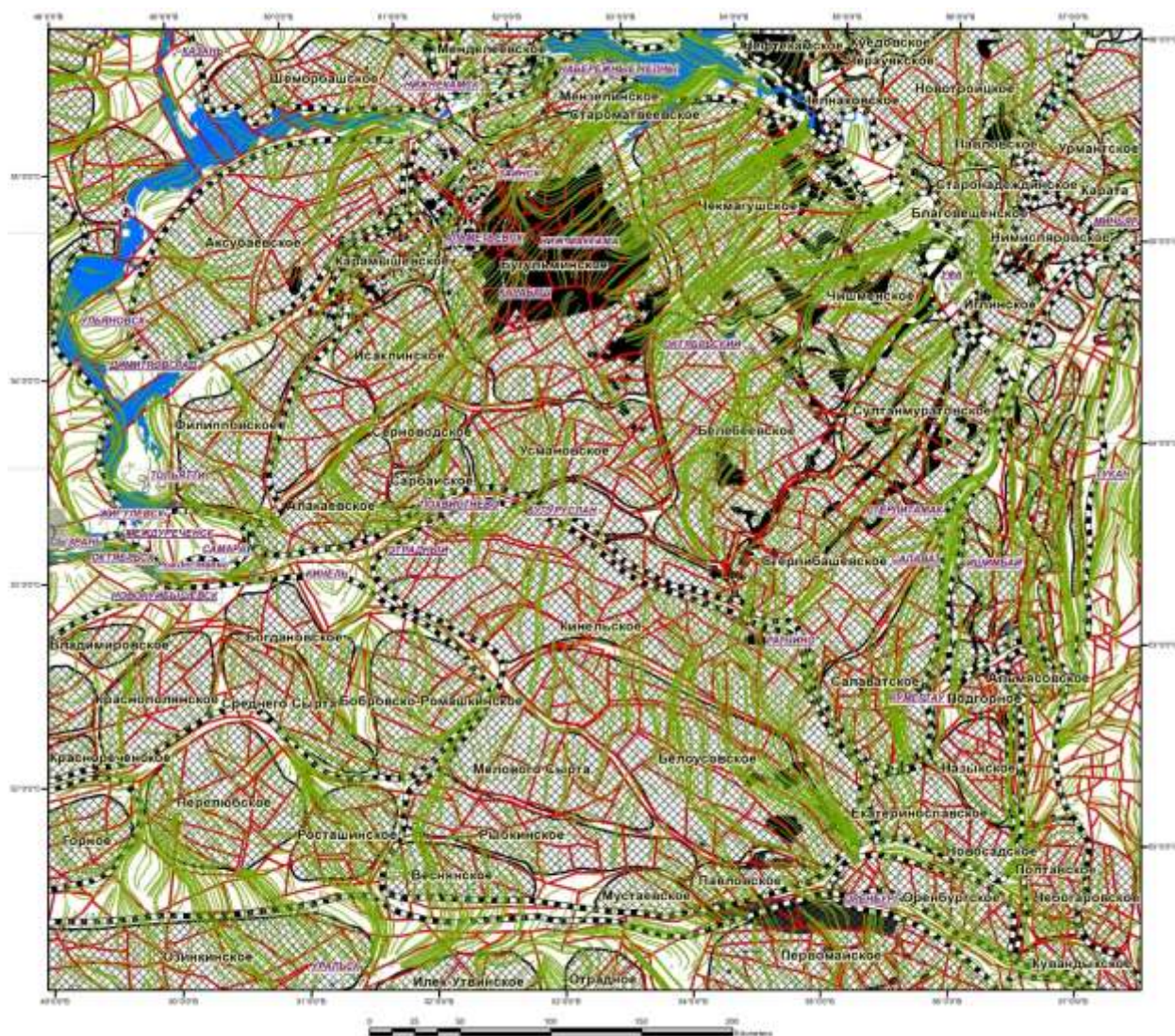


Рисунок 1.5.2. Карта линий вытянутости роз-диаграмм, построенных с помощью программы LESSA, совмещенная с новейшими структурами и месторождениями

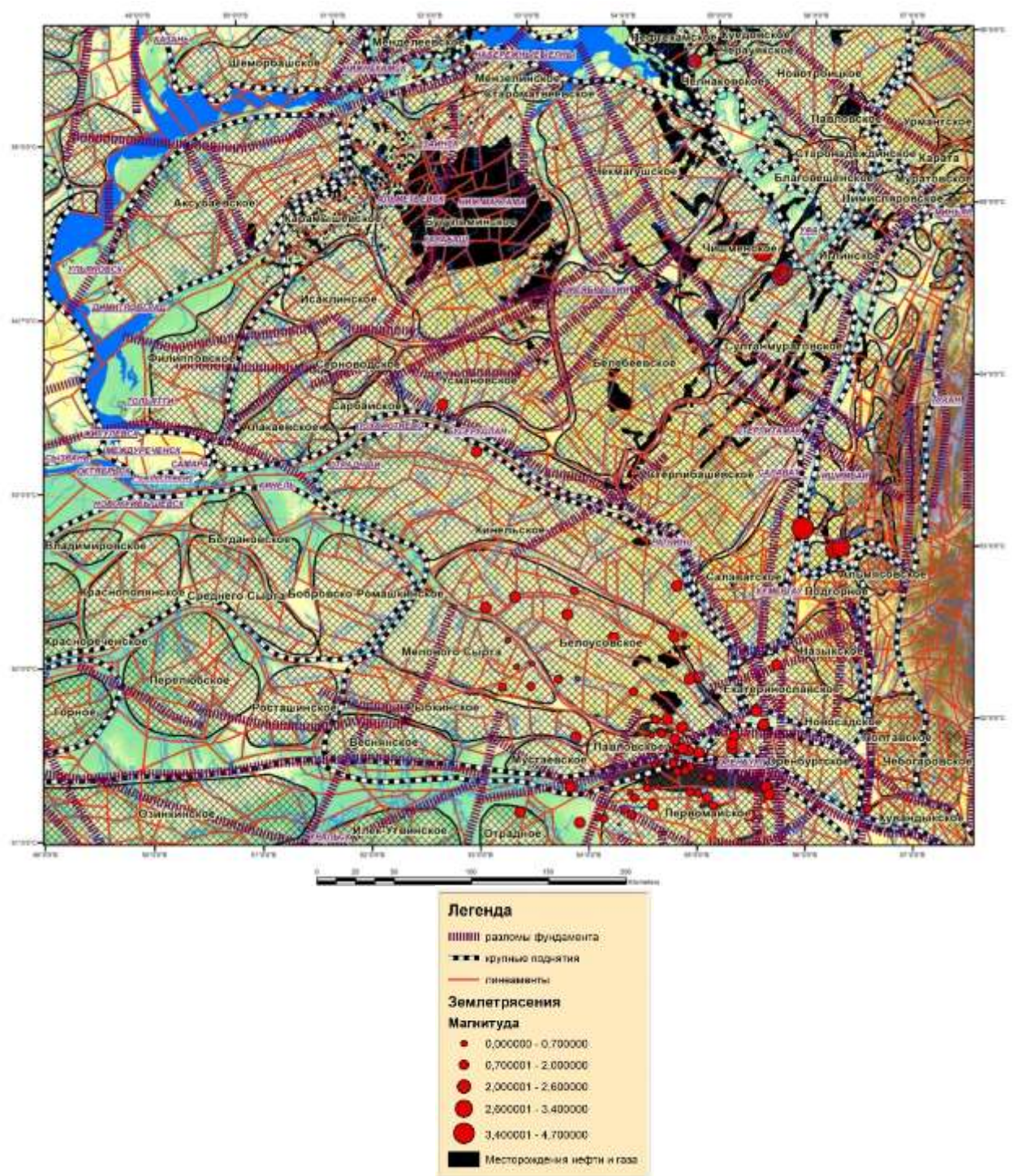


Рисунок 1.5.3. Структурно-геоморфологическая карта, совмещенная с распределением эпицентров землетрясений и месторождений нефти и газа

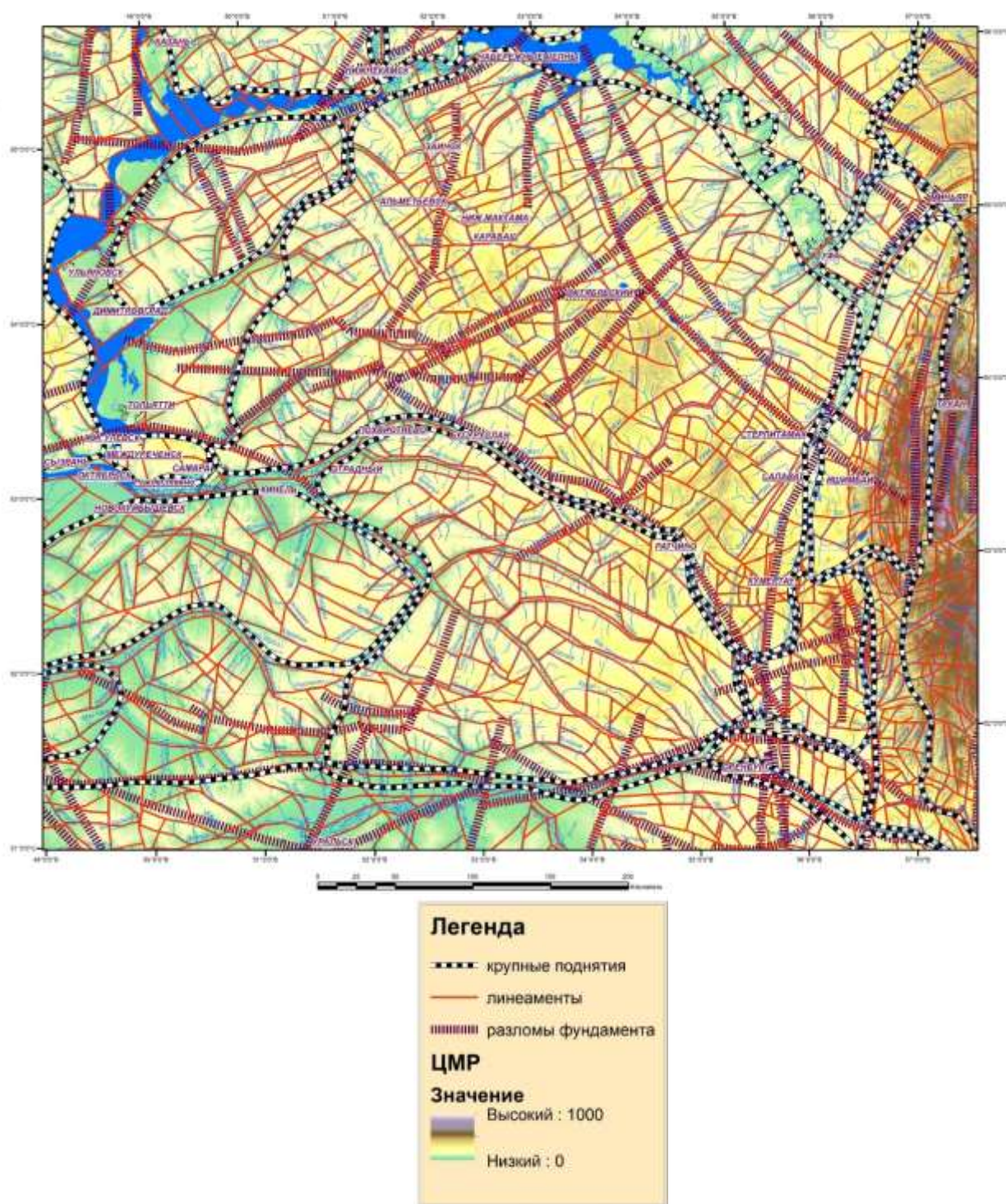


Рисунок 1.5.4. Карта сопоставления линеаментов с разрывными нарушениями фундамента юго-восточной части Русской равнины

В результате структурно-геоморфологического дешифрирования Центральной и Южной частей Предуральского краевого прогиба, граничащего на востоке с Волго-Уральской антеклизой, была составлена схема линеаментов (рисунок 1.5.5). Было выделено 880 линеаментов. Установлено, что доминирующими направлениями простираения межблоковых границ являются северо-восточное, северо-западное, субмеридиональное и субширотное (в порядке уменьшения значимости). Сопоставление роз-диаграмм, иллюстрирующих закономерности ориентировки межблоковых границ и разрывных нарушений фундамента, позволило сделать вывод об их сходстве. Доминирующими направлениями простираения разрывных нарушений являются северо-восточное, кроме того выявлены субмеридиональные и субширотные (в порядке уменьшения значимости). Упомянутое сходство связано с тем, что больше половины разломов находят прямое отражение в рельефе, и им соответствуют линеаменты или слабые зоны (разрывов, трещиноватости, дробления пород). Вместе с тем не все из них являются тектонически активными на современном этапе развития. Таким образом была установлена взаимосвязь между рельефом дневной поверхности и структурами фундамента.

Помимо этого, существует соответствие между геометрией месторождений нефти и газа и новейшим структурами.

Таким образом, для территории юго-востока Русской равнины, где расположена Волго-Уральская антеклиза, установлен сводово-блоковый стиль новейших дислокаций, представляющий собой сочетание разноранговых поднятий и впадин, осложненных линеаменами и разрывными нарушениями северо-западного, северо-восточного, субмеридионального и субширотного простираения.

Выявленные дислокации являются геодинамически активными: с ними часто связаны аномалии гелия и водорода; к ним приурочены эпицентры землетрясений, повышенные значения теплового потока.

Отчетливо проявляется влияние новейшей тектоники на расположение и конфигурацию месторождений нефти и газа, которые приурочены либо к растущим поднятиям, либо вытянуты вдоль зон разломов.

Установленные прямые корреляции новейших дислокаций с глубинными структурами фундамента и нижней части чехла указывают на их роль в формировании новейшего структурного плана юго-востока Русской равнины, который происходит под влиянием Уральского орогена. Проведенное компьютерное 3D моделирование показало, что направление горизонтальных движений в этом районе на западе имеет северо-восточное направление, которое изменяется на субширотное на востоке (рисунок 1.2.3).

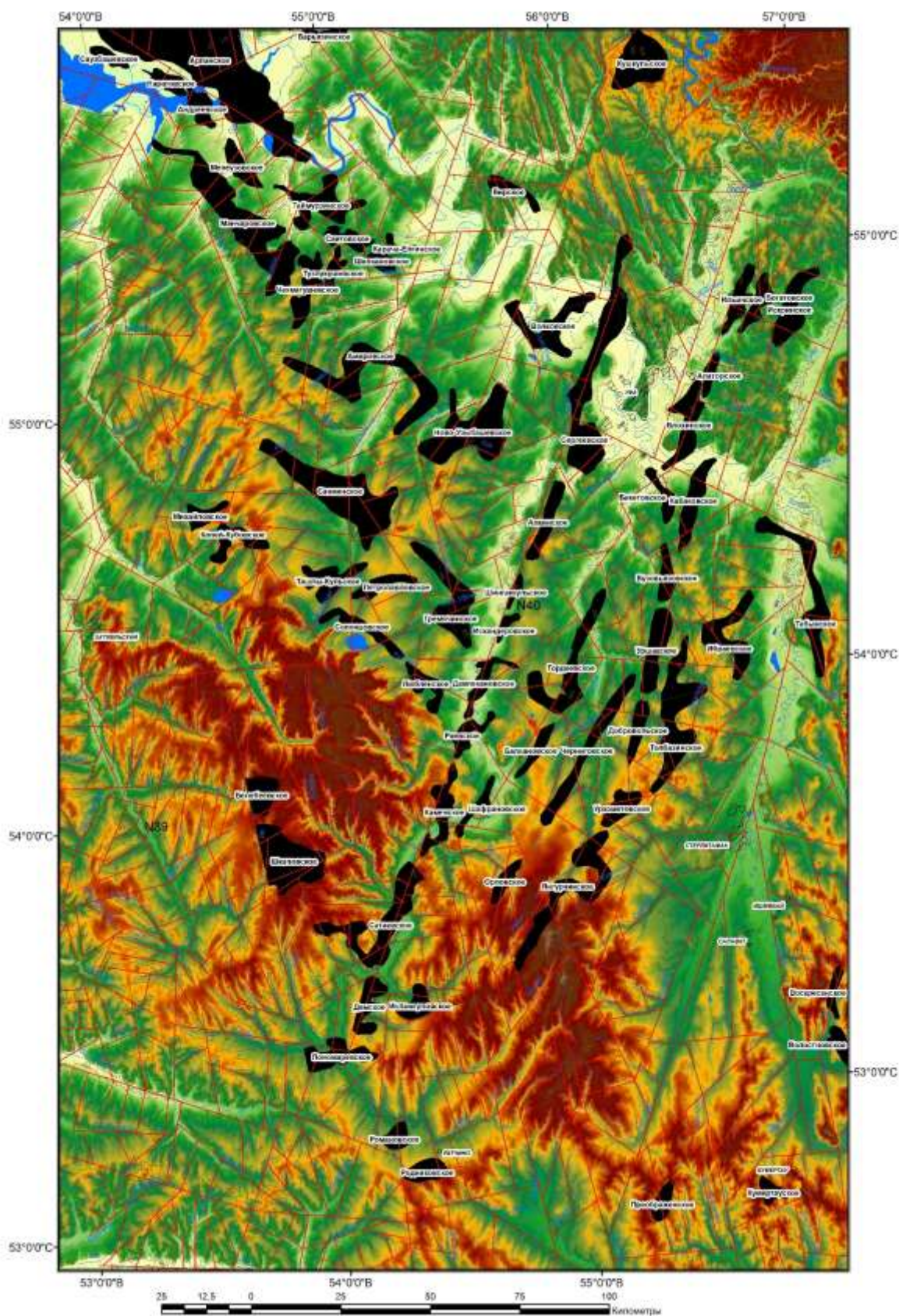


Рисунок 1.5.5. Расположение нефтегазовых месторождений на территории Башкортостана на цифровой модели рельефа с отдешифрированными слабыми зонами

1.6. Структурно-геоморфологический анализ Урала и прилегающих областей

В геоморфологическом отношении район изучения охватывает морфоструктуры Уральского горного сооружения (Южного, Среднего и Северного сегментов), Предуральского прогиба, Русской равнины, юго-востока Тиманского кряжа, Печорской низменности и сопредельные районы Западно-Сибирской плиты (Рисунок 1.6.1). В тектоническом отношении, это такие разные с точки зрения возраста, развития, строения фундамента и осадочного чехла структурные элементы, как древняя Восточно-Европейская эпикарельская платформы (Русская плита), Тимано-Печорская эпибайкальская платформа (Печорская плита), молодая Западно-Сибирская эпигерцинская плита и эпигерцинское омоложенное Уральское горно-складчатое сооружение, становление которого в рельефе происходило в позднемезозойское(?)–раннекайнозойское (позднемеловое(?))–миоценовое время. На современном этапе оно испытывает неотектонический рост, амплитуды новейших движений достигают 1640 м (г. Ямантау).

Уральское горное сооружение вытянуто в субмеридиональном направлении, ширина его сегментов меняется от 220 м и 180 м на юге и севере соответственно, сокращаясь до 80 м в центральной, наиболее узкой части. В геологическом отношении Урал представляет собой серию складчато-надвиговых структур [Камалетдинов и др., 1988], надвинутых, как правило, на Предуральский прогиб, который, в свою очередь, по протяженному надвигу граничит с Восточно-Европейской платформой и по зоне разлома, скорее всего, сбросу с Западно-Сибирской плитой (рисунки 1.6.2; 1,6,3.). На северо-западе к Уралу примыкают Тимано-Печорские структуры, граничащие с Восточно-Европейской платформой по Западно-Тиманскому надвигу. В современном рельефе Предуральский прогиб практически не выражен и зарос поднятиями, так называемыми пармами с амплитудами 500– 900 м (Северный Урал).

Структурно-геоморфологическое дешифрирование в горном сооружении Урала выявило серию поднятий разного ранга, часто выраженных хребтами, которые создают линейно вытянутые системы преимущественно субмеридионального простирания (рисунок 1.6.4). По значениям амплитуд в рельефе системы поднятий группируются в Западную, Центральную и Восточную мегазоны (границы между ними показаны желтой линией на карте). Наиболее ярко выражена в рельефе Центральная мегазона поднятий и глубоко врезаемых долин, где максимальные амплитуды достигают более 1600 м (г. Ямантау – 1640 м, г. Тельпос-Из – 1617 м, г. Денежкин Камень – 1492 м, г. Ишерим – 1331 м и др.). Мегазона ограничена с запада и востока системами протяженных, выраженных в рельефе разрывов. В работе выделены крупные или региональные поднятия, в пределах

которых развиты локальные. Крупные поднятия, как правило, представляют собой линейной формы хребты, например, поднятие на севере района, где находится г. Тельпос-Из с абсолютной отметкой 1617 м (цифра 1 на рисунке 1.6.4.) и поднятие Уралтау (6) на юге.

К западу и востоку амплитуды поднятий снижаются и в Западной и Восточной мегазонах колеблются в пределах 700 – 600 м. Исключением является так называемая система Миньярских локальных поднятий в южном сегменте Урала (3), представляющих в рельефе серию надвинутых на Русскую равнину дугообразно изогнутых хребтов. Вообще в этом сегменте Урала амплитуды поднятий Западной мегазоны увеличиваются, достигая 944 м в области Амшарского поднятия (2), расположенного южнее Миньярского. В пограничных с платформенными равнинами областях амплитуды снижаются и составляют 500 – 400 м и менее. Восточная мегазона поднятий по амплитудам, рисунку и ориентировке отличается от Западной. Максимальные амплитуды выявленных здесь поднятий варьируют от 600 до 300 м и менее. Исключением является поднятие г. Хоросюр (4, рисунок 1.6.4.) с абсолютной отметкой 876 м, которое граничит с Западно-Сибирской равниной на северо-востоке района исследования. Сравнительно высокие амплитуды (635 м) характерны для Магнитогорского поднятия (5, рисунок 1.6.4.), расположенного в Южном сегменте Урала. В целом преобладают структуры вытянутой линейной формы, но встречаются и практически изометричные, например, Магнитогорское (5). Важно отметить, что локальные поднятия ориентированы по-разному и имеют иногда субширотное простирание. Например, серия параллельных широтных локальных поднятий, которые огибают участки долин р. Талтма, Хома и др. на севере района (на карте широтное течение р. Толья). Эти локальные структуры объединяются в крупное поднятие север-северо-восточного простирания. Преобладающее субмеридиональное простирание описанных мегазон иногда изменяется на северо-западное и север-северо-восточное.

Поднятия разделены узкими впадинами-долинами и местами сливаются друг с другом, что затрудняет проведение границы между ними. Спрямоленные участки речных долин, приуроченные к центральным частям впадин, как правило, разрабатывают разрывы, зоны трещиноватости, дробления пород и др., объединенные термином «слабая зона». Слабые зоны часто наследуют разрывы, включая надвиги, взбросы, сбросы, установленные геологическими данными. Среди них Главный Западно-Уральский, Присалатимский, Главный Уральский, Осево́й и другие надвиги, фрагментарно выраженные в рельефе. С севера на юг простирание разрывных дислокаций меняется вслед за паликативными структурами Урала со строго меридионального на север-северо-западное и северо-восточное. Кроме продольной, преимущественно субмеридиональной, для горного

сооружения Урала характерна поперечная зональность, которая выражается в изменении ширины сегментов, простирации хребтов, высотных отметок и др.

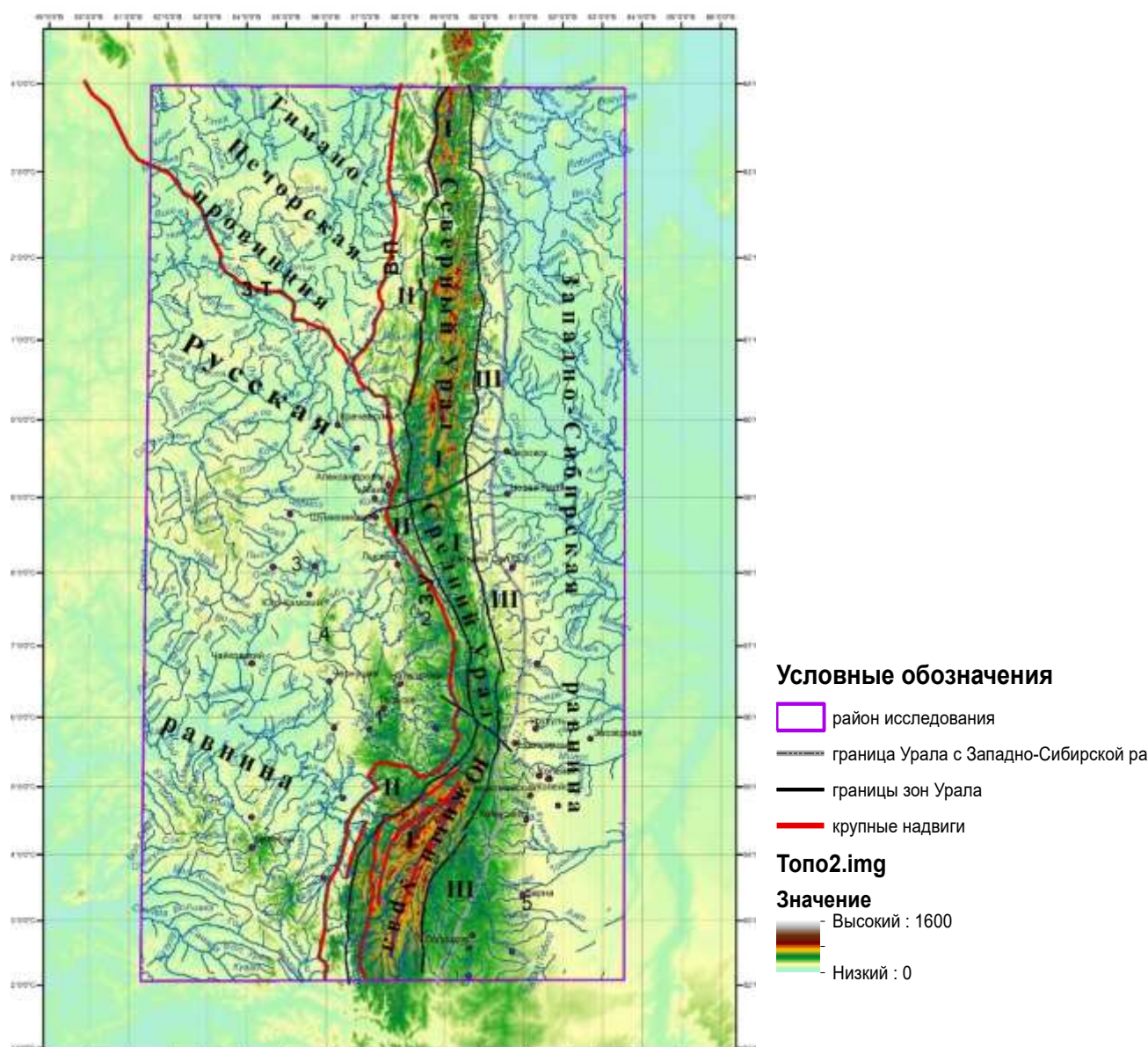


Рисунок 1.6.1. Географическое положение района исследования.

Буквами на карте обозначены крупные надвиги:

З-Т – Западно-Тиманский

В-П – Вуктыльско-Полудовский

З-У – Западно-Уральский

Цифрами обозначены:

1 - Уфимское плато

2 - Сылвинский кряж

3 - Оханская возвышенность

4 – Тулвинская возвышенность

5 – Зауральское плато

Мегазоны Урала:

I – Центральная

II - Западная

III - Восточная

Как показало структурно-геоморфологическое дешифрование, резкое изменение конфигурации и простираения поднятий обусловлено, как правило, наличием слабых зон (разрывами, трещиноватостью пород и др.), которые контролируют эти структуры.

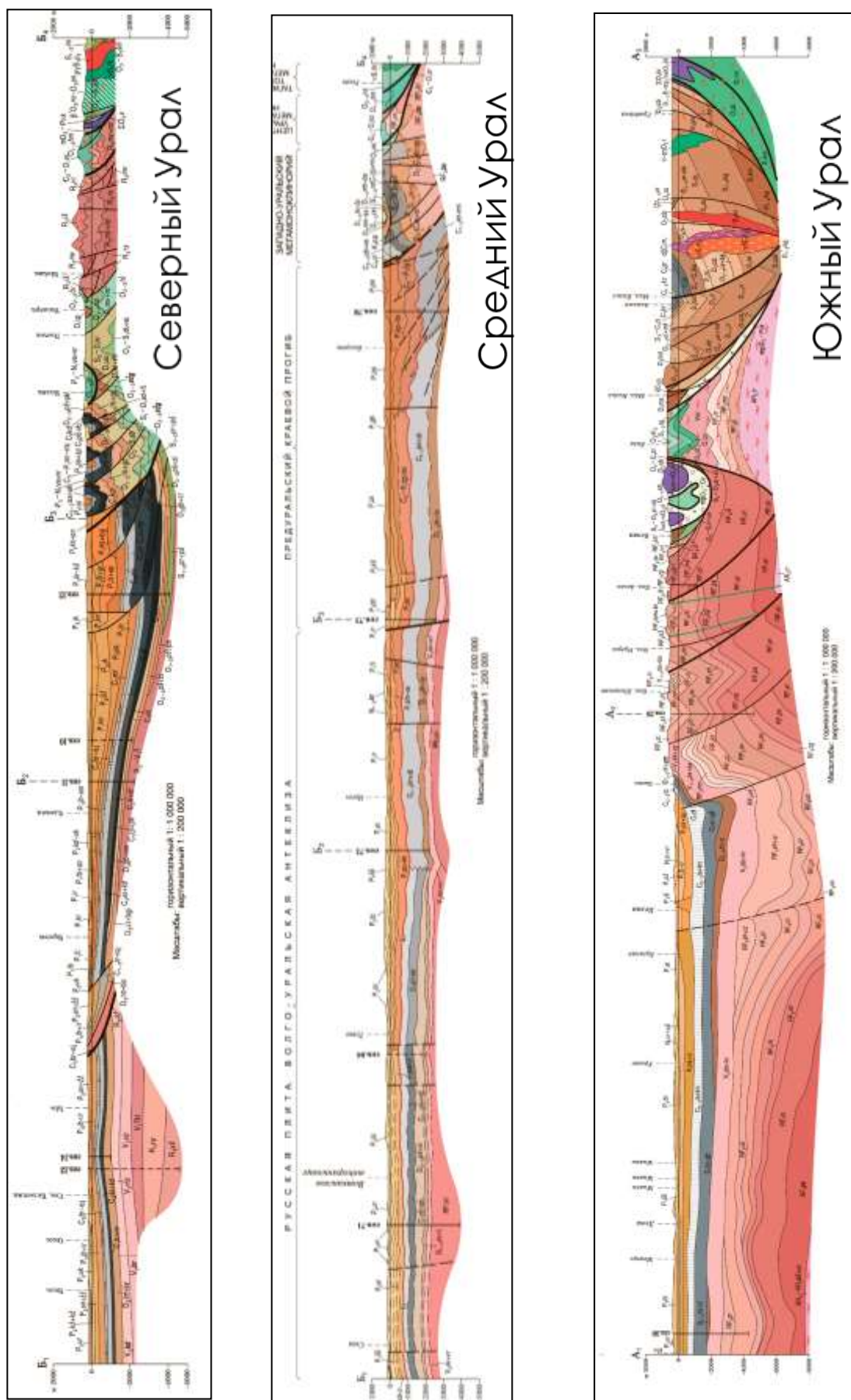


Рисунок 1.6.2. Геологические профили Урала (ВСЕГЕИ, 2013, 2014)

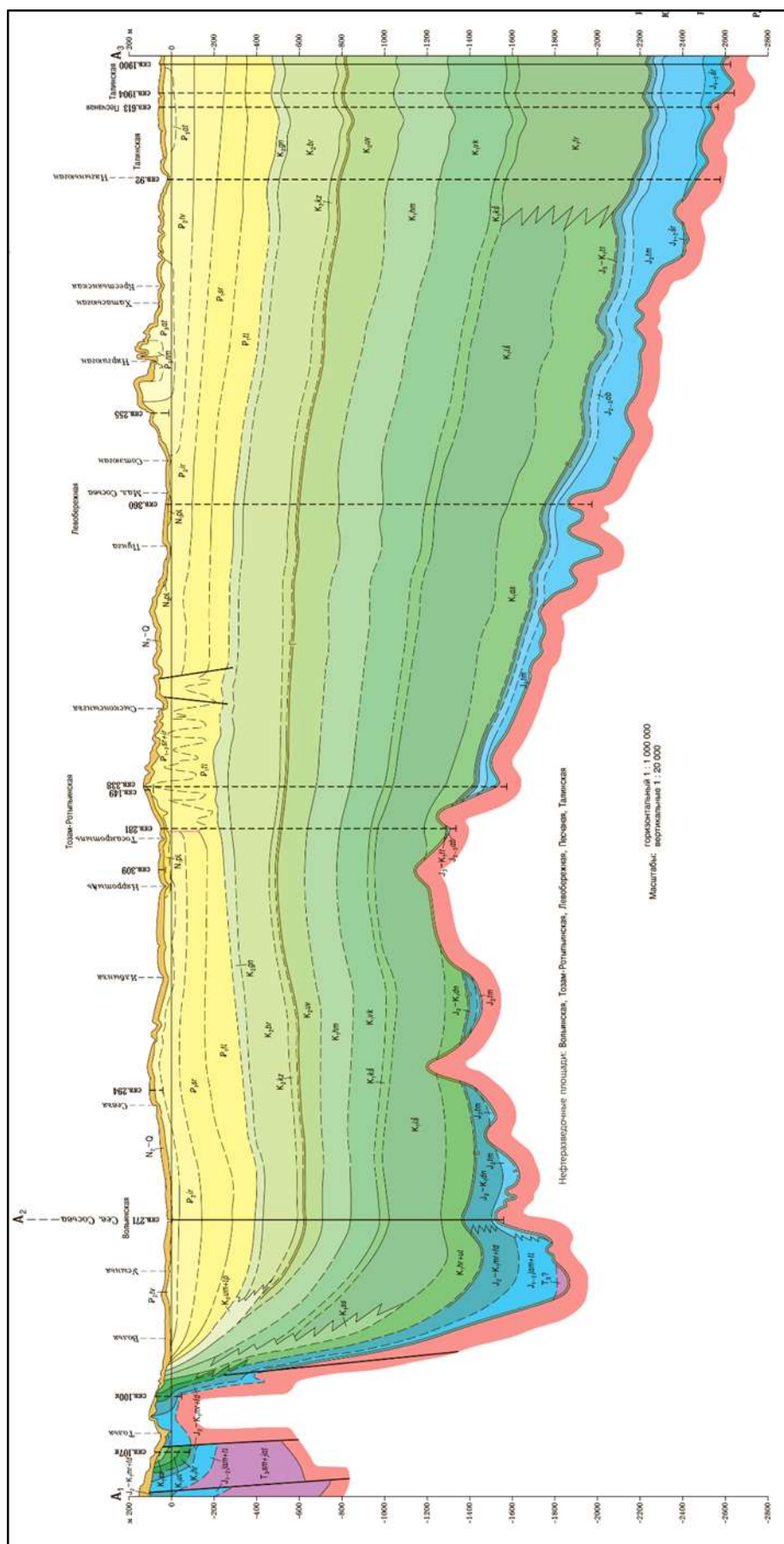


Рисунок 1.6.3. Характер взаимоотношения геологического строения Урала с Западно-Сибирской плитой

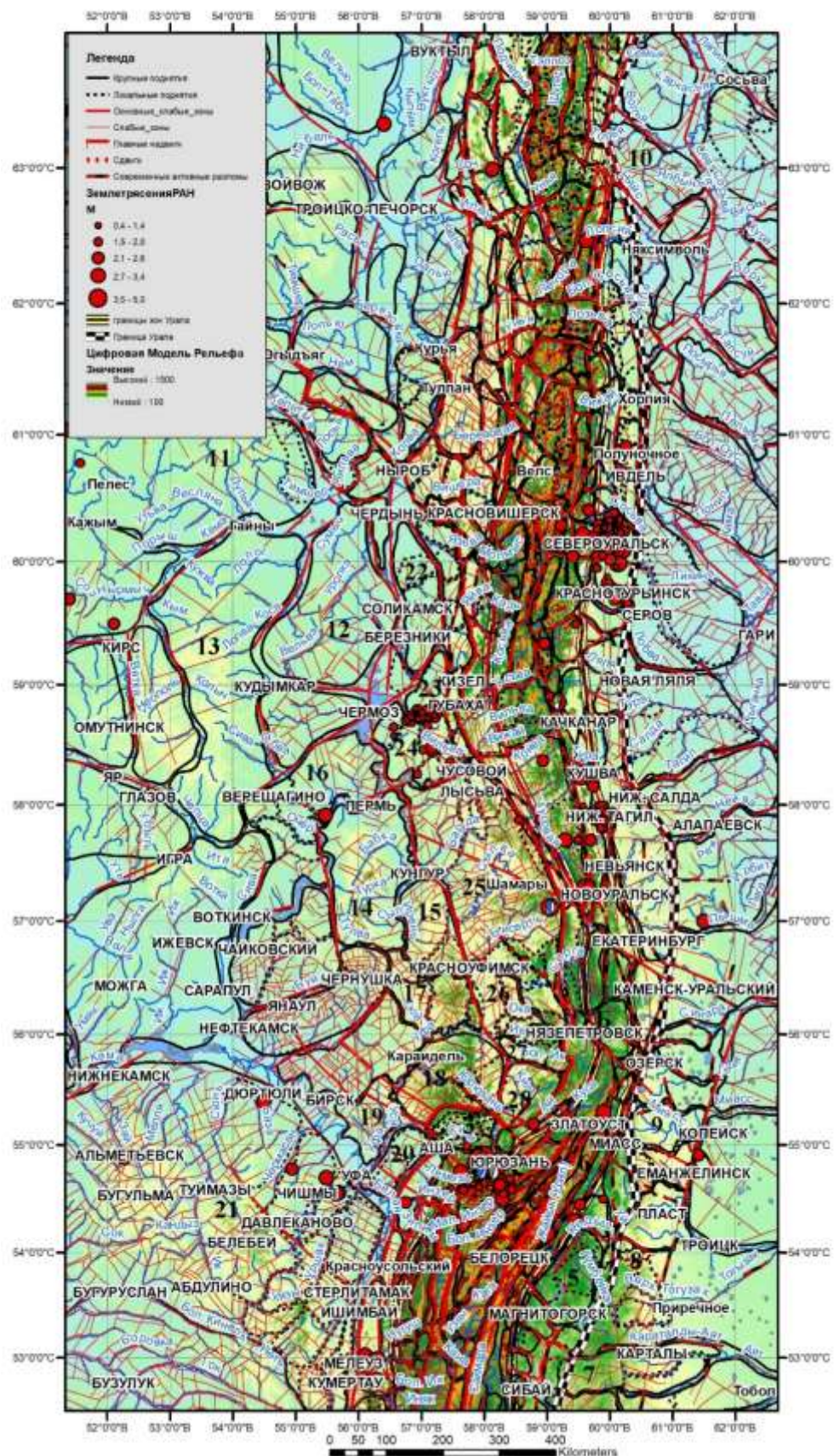


Рисунок 1.6.4. Структурно-геоморфологическая карта Урала и прилегающих областей

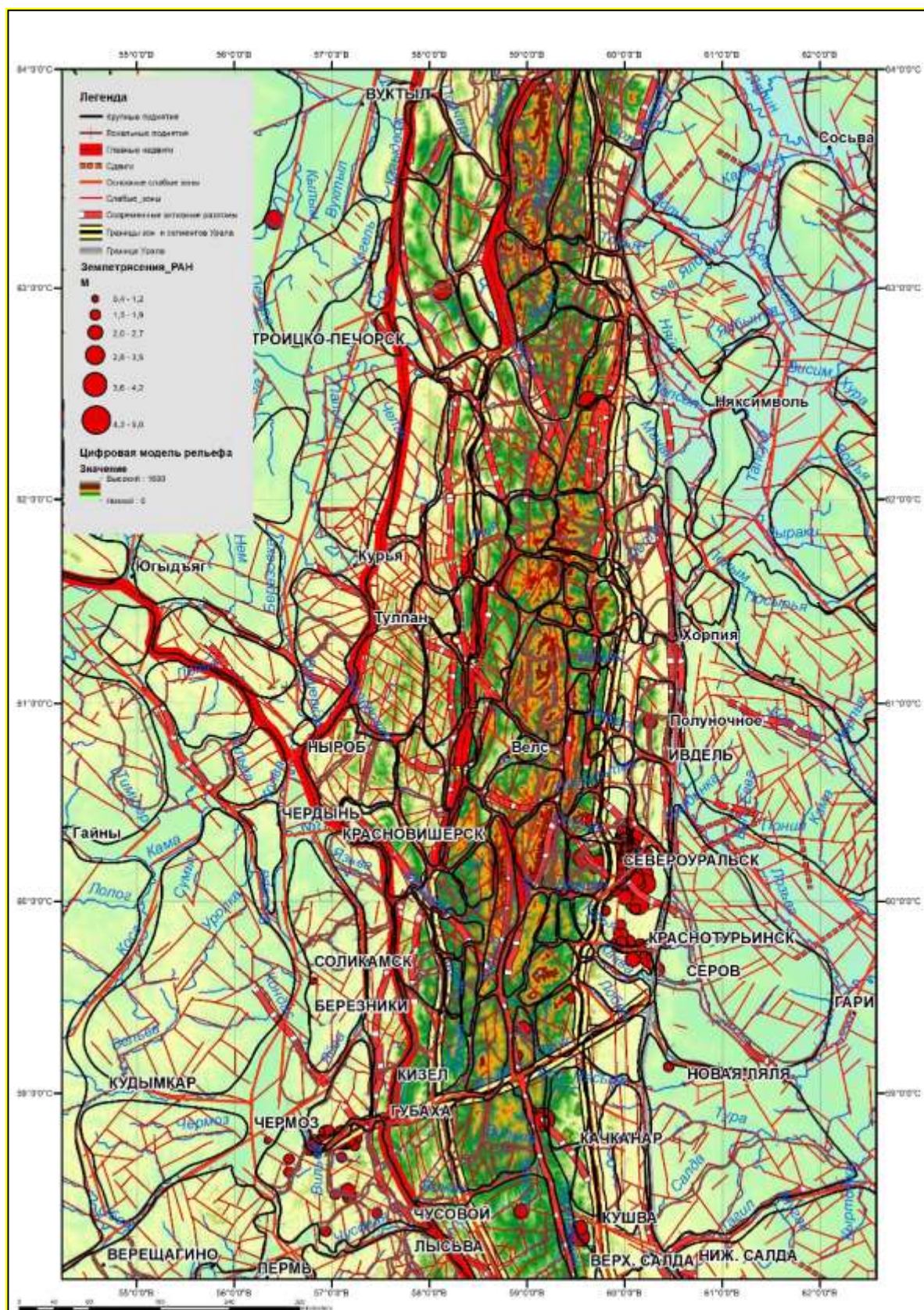


Рисунок 1.6.5. Структурно-геоморфологическая карта Северного сегмента Урала и прилегающих областей

Эти зоны поперечных дислокаций северо-западного и северо-восточного простирания разделяют Урал на Северный, Средний и Южный сегменты, структурно-геоморфологические карты которых представлены на рисунках 1.6.5 и 1.6.6. В пределах крупных региональных сегментов выявлены сегменты более низкого ранга. Так, южная граница сегмента Северного Урала проходит по зоне дислокаций, выраженной в рельефе слабыми зонами северо-восточного простирания, которая разрабатывается фрагментами речных долин Косьвы, Усьвы, Ляли. Вдоль этой зоны резко изменяется простирание пликативных структур, слабых зон, разрывов, включая Главный Уральский, пограничный с Восточно-Европейской платформой, надвиг, с субмеридионального на север-северо-западное. Южнее расположен Средний сегмент, где ширина горного сооружения Урала резко сужается и находится самое узкое место Уральского горного сооружения.

В кинематическом отношении зоны поперечных дислокаций являются, скорее всего, разрывами со сдвиговой составляющей. Дислокации северо-восточного простирания, смещающие водораздельные поверхности хребтов, установлены в районе возвышенностей Парм на северо-западе района, в области сочленения хребтов Яныквотнер и Паснор, где отчетливо виден левосторонний сдвиг (Северный сегмент). Южная граница Среднего Урала проходит по зоне разрывов, которую разрабатывает долина р. Уфа (широтный отрезок) и восточнее – ее приток Бол. Егуста. Вдоль этой границы резко меняется простирание структур с северо-западного на север-северо-восточное, а ширина горного сооружения вновь возрастает. Следует отметить, западнее горного Урала, в пределах Русской равнины в рельефе читается продолжение этой зоны, которое в фундаменте платформы соответствует разлому. Серия подобных параллельных дислокаций (мы их называем основными «слабыми зонами») прослеживается и в пределах самих сегментов Урала. Помимо субширотных и запад-северо-западных разрывных дислокаций, выявлены и северо-восточные, характерные, в основном, для Среднего и Северного Урала.

Проведенное структурно-геоморфологическое дешифрирование позволило выявить в пределах Урала и на прилегающих территориях слабые зоны разных простираний, которые развиты как на границах пликативных структур, так и в их пределах. Некоторые из них следуют вдоль разрывов, установленных геологическими и геолого-геофизическими данными, что указывает на унаследованность древних герцинских структур новейшими дислокациями. Сравнение слабых зон с активными разломами [Зеленин и др., 2022] показало, что многие из них являются современными дислокациями, в том числе сейсмически активными.

Структурно-геоморфологический анализ позволил выделить новейшие структуры обрамления Урала. На востоке, где к Уралу примыкает Западно-Сибирская плита, выявлены

малоамплитудные пологие поднятия с абсолютными отметками 160 – 220 м и впадины, к которым приурочены долины рек.

На юге преобладают субширотно ориентированные поднятия (рисунок 1.6.4.) : Полоцкое (7), Варненское(8), Челябинское (9) и др. На севере их простирание меняется на северо-западное, характерное для Среднесосвинского (10) поднятия. Все они ориентированы вкрест простирания структур Урала. Поднятия и разделяющие их впадины нарушены слабыми зонами, а неровный, причудливый характер их границ обусловлен, как правило, сдвиговыми дислокациями северо-западного и северо-восточного простирания. Преобладает северо-западная ориентировка слабых зон, которые контролируют границы поднятий. Важно отметить, что эта ориентировка структур резко отличается от субмеридионально вытянутых новейших дислокаций Урала.

На севере Урал граничит с Тимано-Печорскими структурами по Вуктыльско-Полюдовскому надвигу. Западнее, в юго-восточной части Тиманского кряжа и ижемской части Печорской низменности выявлены сравнительно малоамплитудные, по-разному ориентированные поднятия с амплитудами до 290 - 245 м. Они разделены впадинами, к которым приурочены речные долины крупных рек Сев. Мылва, Печора, Сойва, Нибель, Кылым и др. Простирание поднятий и впадин контролируются слабыми зонами преимущественно северо-западного простирания, некоторые из них наследуют разломы фундамента, как, например, Верхнеижемский разлом, который частично разрабатывается долиной р. Ижма. Примыкающие к Уралу структуры ориентированы согласно с уральскими дислокациями.

Южнее Западно-Тиманского надвига в рельефе Русской равнины выражены сравнительно малоамплитудные (245-450м на своде) пологие поднятия, разделенные впадинами-долинами (рисунок 1.6.4.). Это Камское изометричное поднятие (11), граничащее с ним на юго-востоке субмеридионально вытянутое Кречевское (12), западнее от него расположено Северо-Коммунарское (13), южнее – Тулвинское (14). Далее на юг в рельефе выражены Сылвинское (15), вытянутое в северо-восточном направлении Верецагинское (16), Табасское (17), состоящее из двух субмеридиональных локальных поднятий, Уфимское (18), Благовещенское (19), Иглинское (20). На юге района расположено крупное Белебеевское поднятие (21) с максимальной амплитудой 479 м, состоящее из нескольких локальных. Граничащие с Уралом локальные поднятия ориентированы согласно с уральскими структурами. Белебеевское поднятие в целом ориентировано с северо-запада на юго-восток в соответствии с преобладающим простиранием слабых зон. Наиболее протяженная из них прослеживается в направлении г. Кандры – г. Стерлитамак. Эта зона коррелирует с разломом в фундаменте. Хорошо

читаются в рельефе по эрозионной сети и слабые зоны северо-восточного простиранья. Восточнее Уфимского (18) выделен ряд поднятий, следующих параллельно структурам Уральского горного сооружения. Среди них Соликамское (22), Макаровское (23), Шумихинское (24), самое крупное Лысвинское (25), Натальинское (26), Вехнеискушское (27), Верхнекигимское (28). Поднятия и разделяющие их впадины нарушены слабыми зонами субмеридионального, северо-западного и северо-восточного простиранья, соответствующего структурам Урала.

Автоматизированная обработка радарных изображений с использованием программы Lessa позволил установить следующие закономерности. Рисунок роз-диаграмм эрозионной сети индивидуален для каждой из региональных структур. Так, в области, прилегающей к Уральскому орогену на западе он имеет субмеридиональное простиранье, чем резко отличается от роз-диаграмм Западно-Сибирской плиты (рисунок 1.6.7). Максимальные значения плотности эрозионной сети локализуются в областях поднятий Тимано-Печорской области и Русской равнины, что указывает на более активный характер проявления новейших движений в результате воздействия Уральского горного сооружения (рисунок 1.6.8.). В области Западно-Сибирской равнины эта корреляция существенно ниже.

Проведенные комплексные исследования позволили выявить существенные различия в рисунках новейших дислокациях Уральского горного сооружения и прилегающих к нему платформенных территорий. Многие дислокации коррелируют с геологическими структурами Урала и фундаментом пограничных территорий и являются активными разломами на современном этапе, что подчеркивается сейсмичностью.

На полученных материалах видно, что новейшие структуры Русской равнины, Предуральского прогиба, восточной части Тимано-Печорской области находятся под влиянием деформаций Уральского орогена и формируются в едином с ним поле напряжения, т.е. субширотном сжатии. В то же время на территории Западно-Сибирской равнины господствуют другие геодинамические условия, связанные с обстановкой субмеридионального сжатия или субширотного растяжения. Эти выводы хорошо согласуются с распределением сейсмичности, которая локализуется в пределах Уральского орогена и примыкающей к нему территории.

Проведенное компьютерное моделирование также подтверждает этот вывод. На рисунке 1.2.3. отчетливо видно изменение направления горизонтальных движений с преобладающего северо-восточного, характерного для Русской равнины, на юго-восточное, доминирующего в области Западно-Сибирской плиты. Исключением являются северные и самые южные районы, где тренды движений изменяются, но по-прежнему сохраняется их различие.

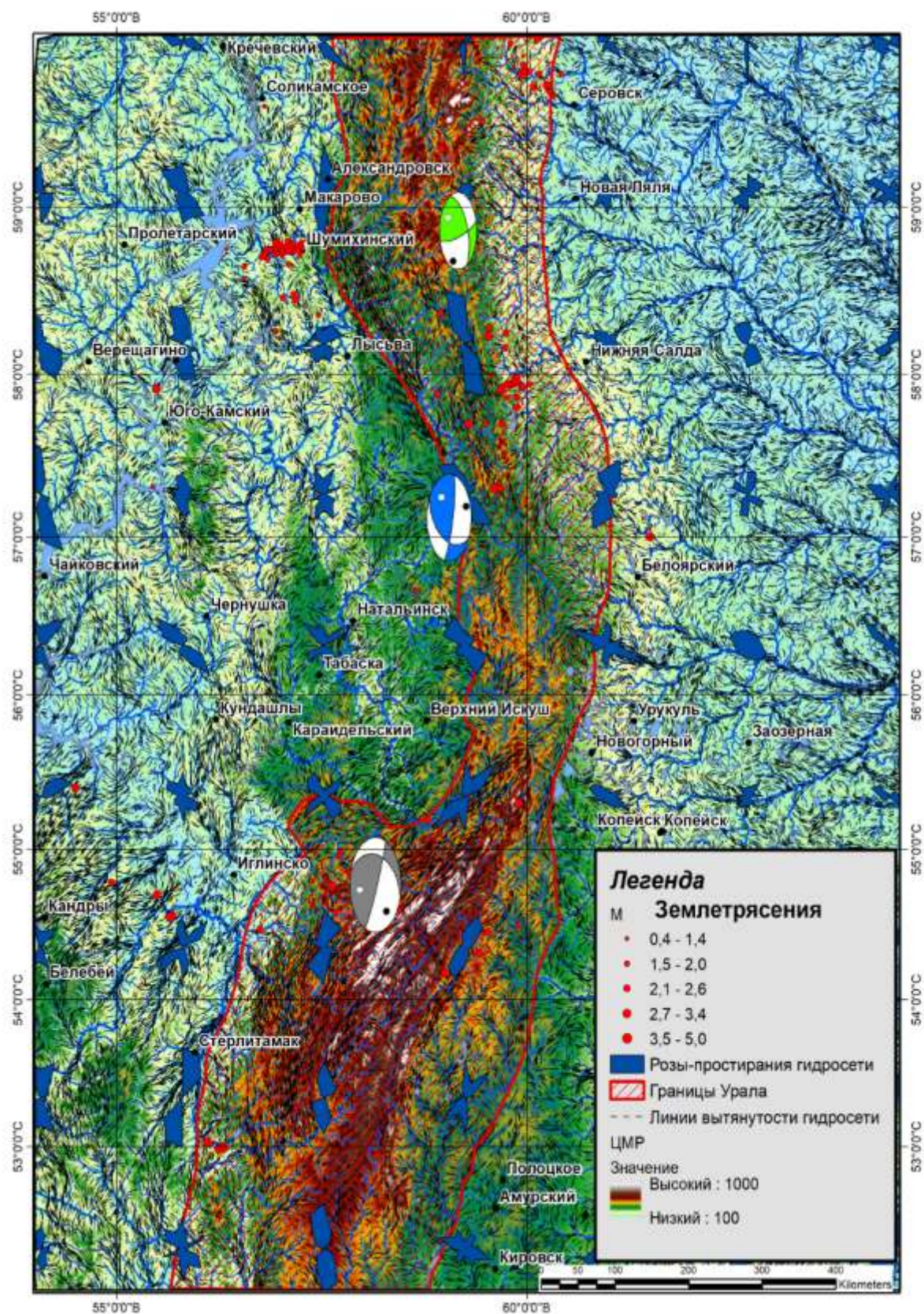


Рисунок 1.6.7. Карта ориентировок гидросети, построенная с помощью программы Lessa, с нанесенными на нее землетрясениями.

1.7. Неотектоника и геодинамика Скифской плиты

Новейшая тектоника

Эпипалеозойская Скифская плита расположена между горно-складчатым сооружением Большого Кавказа на юге и Восточно-Европейской платформой на севере (рисунок 1.7.1). В геоморфологическом отношении она представляет собой платформенную равнину с абсолютными отметками рельефа, превышающими 500 м на юге Ставропольского поднятия, и минимальными значениями менее 0 в районе Прикаспийской впадины, расположенной на востоке. Наблюдается уменьшение значений амплитуд по мере удаления на север от Кавказа. С целью изучения новейшей тектоники и геодинамики района использовался комплекс методов, включавших структурно-геоморфологический анализ, подразумевавший визуальное и автоматизированное дешифрирование топографических и космических материалов, а также статистическую обработку радарных космических изображений с помощью специализированной компьютерной программы LESSA. Статистическая обработка сводилась к построению роз-диаграмм и схем направления их вытянутости, плотностей линеаментов различных простираний, рассчитанных в скользящем окне. Количественная оценка амплитуд новейших тектонических движений проводилась по методу анализа кривых тектонического прогибания, известного в литературе как *back-stripping*. Полученные материалы сопоставлялись с глубинными дислокациями, главным образом, со структурами фундамента. Также было выполнено аналоговое тектонофизическое моделирование. Для оценки геодинамической активности результаты работ сравнивались с сейсмичностью, характером распределения теплового потока, современными тектоническими движениями и др.

В результате проведенного структурно-геоморфологического анализа была построена карта, на которой показаны контуры растущих поднятий и впадин, осложненных слабыми зонами [Костенко, Панина, 2001]. Структурно-геоморфологическая карта явилась своеобразным каркасом для дальнейших неотектонических построений. Как известно, на картах новейшей тектоники амплитуды новейших движений показываются в изобазлах, т.е. в амплитудах тектонических движений за новейший этап. В районе исследования они рассчитывались по кривым тектонических движений, полученных по методике *back-stripping*, предполагающей определение амплитуд и скоростей тектонических движений для различных интервалов времени. В нашем случае эти амплитуды определялись для интервала времени, начиная с позднего миоцена (примерно с 10 млн. лет) по четвертичный период включительно.

Общее прогибание территории в какой-либо точке складывается из двух составляющих: тектонической, обусловленной эндогенными факторами, и изостатической, связанной с

весом вышележащих толщ. Величина общего прогибания зависит от глубины бассейна в период осадконакопления, эвстатических колебаний уровня моря, коэффициента уплотнения пород с глубиной, а также проседания за счет давления осадочной толщи и воды. Задача back-stripping анализа и заключается в вычлениении величины тектонической составляющей из амплитуды общего прогибания. Расчет тектонической составляющей производится согласно модели локальной изостазии [Cloetingh, Kooi, 1990]. Полученная величина в нашем случае и принималась за амплитуду тектонических движений. Расчеты показывают, что в среднем примерно 70 % общего погружения обусловлено нагрузкой мощных осадочных толщ и только около 30 % составляет тектоническая компонента. Сопоставление кривых тектонических движений, построенных для различных районов Скифской плиты, позволило представить новейшую историю геологического развития этого региона в контексте с фазами активизации Кавказского горного сооружения.

Проведенные комплексные структурно-геоморфологические, геолого-геофизические, включая back-striping, легли в основу создания карты позднеорогенных дислокаций. На построенной карте новейшей тектоники (рисунок 1.7.1) для интервала времени, начиная с позднего сармата, в изобазках отражаются очертания главных структур новейшего этапа развития – поднятий и впадин, простирающие которых контролируется субширотными и субмеридиональными слабыми зонами (разрывов, трещиноватости, дробления пород и др.), причем преобладают субширотные (субкавказские) простираения [Панина, 2009].

Южную территорию, прилегающую к орогену Большого Кавказа, занимает Предкавказский тыловой прогиб, заложившийся в конце олигоцена - раннем миоцене и выраженный в современной структуре Западно- и Восточно-Кубанской предгорными впадинами на западе и Терско-Каспийской на востоке. Максимальные амплитуды погружения, установленные в периферических частях Западно-Кубанской и Терско-Каспийской впадин и составляют более 1000 м. Эти впадины разделяются субмеридиональным Ставропольским поднятием, значительно увеличившим свои размеры к современной эпохе. Изобазы в его пределах характеризуются высокими положительными значениями от 100 до 500 м и более. Выявленные новейшие структуры первого ранга в целом подчиняются традиционному делению Кавказа и Предкавказья на западный, центральный и восточный сегменты.

впадина осложнена погребенной Анастасиевско-Краснодарской антиклиналью, практически не имеющей выражения в рельефе. Восточнее расположен Майкопский (Адыгейский) выступ, отделяющий Западно-Кубанскую от Восточно-Кубанской впадины. В современном рельефе он представляет собой область поднятия, суммарные амплитуды которого колеблются от 0 на севере до 300 м на юге (рисунок 1.7.1.).

Восточно-Кубанская впадина существенно сократилась в размерах и выросла в современном рельефе по сравнению с палеозойским структурным планом. В течение палеозоя, мезозоя и кайнозоя, вплоть до позднего миоцена она развивалась как отрицательная структура. В современном рельефе – это высокая равнина, которая сменяется к югу предгорьем с абсолютными отметками до 500 м, что свидетельствует о вовлечении ее в поднятие на новейшем этапе. По сравнению с Западно-Кубанской, Восточно-Кубанская впадина начала раньше испытывать тенденцию к поднятию. На кривых тектонического прогибания (subsidence curves) первое поднятие, длившееся до понта, фиксируется на рубеже 10–9 млн. лет. Позднее наступает прогибание, которое продолжается до плиоцена, после чего впадина испытывает устойчивую тенденцию к воздыманию.

С севера и северо-востока Западно-Кубанская впадина обрамляется Крыловским и Выселковским поднятиями соответственно (рисунок 1.7.1.). Эти поднятия слабо выражены в рельефе (абсолютные отметки Крыловского поднятия возрастают с запада на восток от 20 до 129 м) и выделяются по косвенным геоморфологическим признакам – оконтуриванию их склонов речными долинами, которые нередко наследуют ёзоны разрывных нарушений фундамента. Субширотное Крыловское поднятие ограничивается с юга долиной реки Челбас и ее западным продолжением, выраженным в рельефе серией лиманов. Эти лиманы выстраиваются вдоль Бейсугского разлома палеозойского фундамента, который интерпретируется как главный Азовский надвиг [Попков, 2001]. В рельефе здесь располагается узкая Челбасская впадина, центральная часть которой разрабатывается долиной реки Челбас. На юго-востоке поднятие граничит с северо-западной периферией Ставропольского поднятия. Северная граница Крыловского поднятия совпадает с широтными отрезками долин рек Ея и Средний Егорлык, которые являются отражением в рельефе субширотной шовной структуры на границе древней Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. Слабо выраженная в рельефе северо-восточная часть поднятия соответствует Сальскому поперечному выступу палеозойского фундамента, а западная – Старо-Минской антиклинали в мезозойских комплексах. По данным бурения и сейсморазведки антиклиналь осложнена надвигом с южным падением сместителя.

На севере Крыловское поднятие по узкой впадине-долине, разрабатываемой рекой Ея, граничит с субширотным Батайским поднятием, абсолютные отметки которого колеблются от 30 до 109 м. Северная часть поднятия в фундаменте соответствует своду Ростовского выступа, а южная – его склону. Севернее расположена узкая Западно-Манычская впадина-долина, которая открывается в Таганрогский залив. Она граничит на севере с Новочеркасским поднятием. Западно-Манычская впадина практически вырождена в современном рельефе. Лишь долина реки Западный Маныч указывает на существование здесь некогда широкой впадины, являвшейся западным продолжением Манычского прогиба. Создается впечатление, что она зажата с юга и севера Батайским и Новочеркасским поднятиями соответственно. Некоторыми исследователями Батайское и Крыловское поднятия объединяются в единую морфоструктуру – Ейское поднятие [Новейшая тектоника и геодинамика, 2006].

Юго-восточнее Челбасской впадины выделяется Выселковское поднятие причудливой конфигурации. Поднятие характеризуется абсолютными отметками рельефа 25-40 м на западе и 103 м на востоке, на водоразделе рек Бейсуг и Бейсужин. Повышенная эрозионная расчлененность рельефа указывает на вовлечение в поднятие древних погребенных структур фундамента Каневско-Березанской и Тимашевской ступени. Сейсморазведкой здесь установлены надвиги и разрывы, затрагивающие кайнозойские отложения [Попков, 2001]. Восточная часть Выселковского поднятия соответствует втянутой в воздымание Кропоткинской впадине фундамента, существенно сократившейся в размерах к современной эпохе.

Центральный сегмент. Субмеридиональное Ставропольское поднятие выражено положительными значениями изобаз от 100 на севере до 500 м и более на юге, в пограничной области с Кавказским горным сооружением. По кровле хадумского горизонта (олигоцен-нижний миоцен) выделяется серия антиклиналей преимущественно северо-западного и субширотного простирания, которые выражены в рельефе частными поднятиями (Расшеватское, Камбулатское и др.). Максимальные значения изобаз (500 м и более) характерны для Армавиرو-Невиномысской системы поднятий палеозойского фундамента. В северном направлении значение изобаз снижается до 100 м.

Ставропольское поднятие нарушается серией слабых зон (разрывов, трещиноватости, дроблением пород) северо-западного простирания, которые разрабатываются речными долинами и фрагментарно наследуют разломы фундамента (Армавиرو-Невиномысская зона). Выявлены и субмеридиональные слабые зоны. К наиболее протяженным из них относятся Армавирская, Калаусская, Кумско-Лысогорская (рисунок 1.7.1).

К современной эпохе Ставропольское поднятие существенно увеличилось в размерах по сравнению с его границами в палеозое. За счет роста Ставропольской структуры на восток втянута в поднятие область Чернолесской и частично Терско-Кумской впадин. Растущие здесь поднятия выражены в рельефе альтитудами 235-100 м и менее и маркируются песками. Разрастание Ставропольского поднятия на север отразилось и на конфигурации Восточно-Манычской впадины, граничащей с ним по Манычскому разлому палеозойского заложения. Впадина резко сужается и практически сливается с расположенной севернее Сальско-Манычской грядой, а амплитуды новейших погружений в ее пределах составляют –100 м. В области Прикаспийской равнины ее продолжением служит узкая впадина-долина, разрабатываемая нижним течением р. Кума. Впадина осложнена частными поднятиями. Линейный характер Восточно-Манычской впадины и ее западного (Западно-Манычская впадина) и восточного продолжений обусловлен, по-видимому, влиянием протяженного глубинного тектонического шва.

Севернее Восточно-Манычской впадины в рельефе выделяется Сальско-Манычская гряда, восточная периклиналь которой смыкается с Южно-Ергенинским субмеридиональным поднятием. С севера Сальско-Манычская гряда отделяется от Северо-Сальского поднятия узкой Сальской впадиной, к которой приурочена долина р. Сал. Эти новейшие структуры образуют единое Сальско-Ергенинское поднятие (рисунок 1.7.1.). Более детальные структурно-геоморфологические исследования позволили выявить здесь частные дислокации, осложняющие эту крупную структуру. В современном структурном плане в пределах Южно - Ергенинской возвышенности выявлена серия, как правило, линейно вытянутых в северо-западном направлении, поднятий [Панина, Костенко, 2005]. Амплитуды их составляют примерно 100 м и более. Корреляция дислокаций рельефа и структурного плана подошвы ергенинской свиты (плиоцен) показала, что эти поднятия существовали уже в плиоцене. Поднятия разделены узкими впадинами, к которым приурочены реки Акшибай, Кегульта, Улан-Зуха, Яшкуль, Шаред и др. Эти речные долины разрабатывают, скорее всего, разрывы со сдвиговой составляющей. Наиболее протяженной из них является Акшибай-Ергенинская зона разрывов. Подтверждением этого является кулисное расположение частных поднятий. О взбросо-сдвиговом характере разрывов в юго-восточной части кряжа Карпинского упоминается и в работе [Копп, 2000].

Сальско-Манычская гряда является отражением в рельефе герцинских деформаций кряжа Карпинского. Согласно современным представлениям, базирующимся на сейсмических данных, палеозойский фундамент кряжа Карпинского характеризуется складчато-надвиговым строением, а сам кряж рассматривается как шовная структура, ограничивающая с юга древнюю Восточно-Европейскую платформу. Западным ее

продолжением является поднятие Донбасса, восточным – система погребенных поднятий Прикаспийской впадины. Эта протяженная структура выражена на карте мантийных неоднородностей [Егорова, Старостенко, 2006], и, согласно данным сейсморазведки, ограничивается с юга и севера разломами. Многие разломы, установленные по геофизическим данным, имеют северо-западное простирание и выражены в рельефе. Так, Южно-Манычская зона разрывов, которая обнаружена сейсмическими исследованиями в кровле доюрского комплекса и фундамента, и продолжается вплоть до поверхности Мохоровичича [Волож, 1999], отражается в современном рельефе. Наследуется и расположенная севернее Ашибай - Ергенинская зона разрывов.

Восточный сегмент. Здесь расположена Терско-Каспийская предгорная впадина, которая открывается на востоке в Каспийское море, где находится наиболее погруженная ее часть (рисунок 1.7.1.). Южной границей впадины с горным сооружением Большого Кавказа служит зона Владикавказского разлома, восточным продолжением которого является надвиг Предгорного Дагестана. В рельефе эти зоны разломов выражены резким изменением амплитуд горного сооружения и предгорной впадины.

Терско-Каспийская впадина осложнена субширотными Сунженским и Терским хребтами, которые отделяются друг от друга частными впадинами. Хребты включают серию частных субширотных поднятий, суммарные амплитуды новейших движений которых оцениваются величиной более 500 метров. В то время как амплитуды погружения в частных впадинах, начиная с позднего миоцена, составляют по данным back-stripping более 1000 м. В кайнозойских и мезозойских комплексах поднятия представляют собой два этажа складчато-надвиговых структур, которые ограничены снизу зонами срыва, приуроченными к майкопскому (олигоцен-нижний миоцен) и солевому (верхняя юра) комплексам. Эти структуры, образовавшиеся в результате восточно-кавказской (предакчагыльской) тектонической фазы, продолжают формироваться и на современном этапе [Панина, 1988]. Надвиги и взбросы субширотного простирания первого этажа, нарушающие миоцен – плиоценовые комплексы, выражены в рельефе. Помимо субширотных, в рельефе выявляются и дислокации северо-западного простирания, являющиеся, по-видимому, сдвигами. Вдоль этих зон происходит смещение молодых поднятий, с ними связаны коленообразные изгибы р. Терек, они служат границами поднятий разной амплитуды (рисунок 1.7.1.). Наиболее протяженные из них представляют собой отражение в рельефе зон разломов, установленных геофизическими методами. Среди них Датыхско - Ахловская, Бенойско-Эльдаровская, зоны разрывов, а также Армавиرو-Невиномысский разлом. Обращает на себя внимание строго широтное простирание

Терского хребта, западным продолжением которого является широтный отрезок долины реки Малка. По геофизическим данным здесь в фундаменте выделяется Срединный разлом.

Севернее Терско-Каспийской расположена Терско-Кумская впадина, осложненная погребенными поднятиями Ногайской ступени на юго-востоке. В рельефе эти поднятия слабо выражены и маркируются скоплениями песков [Панина, Костенко 2005]. В палеозойском фундаменте здесь находится прогиб с глубинами до -12 км, что может указывать на бескорневой характер структур мезозойско-кайнозойского комплекса, выявленных ранее по сейсмическим материалам [Короновский, Панина, 1995].

Наиболее четко выражено в рельефе расположенное к северу от Терско - Кумской впадины Прикумское поднятие, оконтуриваемое субширотным отрезком долины реки Кума. Поднятие имеет субширотную ориентировку и контролируется Южно-Манычским и Южно-Сальско-Манычским зонами разрывов. Сводовая часть поднятия соответствует изобазе -50 м. Проведенные ранее геолого-геофизические и структурно-геоморфологические исследования позволили выявить здесь ряд погребенных поднятий (Кочубеевское, Восточно-Сухокумское и др.) в фундаменте и мезозойских отложениях [Несмеянов и др., 1967]. Поднятия выражены в верхнеплиоцен-четвертичном комплексе, затухают с глубиной и выполаживаются в майкопских (олигоцен-нижний миоцен) глинистых отложениях.

Обширная Прикаспийская впадина частично располагается в восточной периферической части Скифской плиты. Она также осложняется серией погребенных поднятий, проявляющихся в рельефе скоплениями песков. Эти поднятия являются восточным продолжением структур Сальско-Манычской гряды, втянутых в воздымание на новейшем этапе. Согласно данным бурения и сейсморазведки эти поднятия хорошо выражены в плиоцен-четвертичном комплексе и в целом наследуют мезозойские дислокации. Однако отмечается некоторое смещение их сводов в плиоцен-четвертичных комплексах относительно мезозойских.

Описанные выше структуры нарушены слабыми зонами северо-западной (субкавказской) и субмеридиональной ориентировки. Последние, которые пересекают восточный сегмент Скифской плиты и прослеживаются на значительные расстояния вплоть до горного сооружения Большого Кавказа. Особенно четко они выражены в южной части. Это Урухская, Аргунско-Терская и Аграханская слабые зоны (рисунок 1.7.1.). В современном рельефе и Ергенинский уступ представляет собой серию субмеридиональных сбросов, нарушенных субширотными сдвиговыми дислокациями [Панина, Костенко, 2005]. Некоторые из субмеридиональных зон разрывов описаны как правосторонние сдвиги, как, например, Акташская [Никитин, 1987].

Таким образом, новейшие поднятия и впадины Скифской плиты, осложненные слабыми зонами (зонами разрывов, трещиноватости, дробления пород) субмеридионального простирания, отражают ступенчатое строение региона. Эти зоны зачастую пересекают всю территорию Скифской плиты, продолжаясь в горное сооружение Большого Кавказа. Они служат границами блоков, испытывавших знакопеременные движения, начиная, по крайней мере, со среднего миоцена [Костенко, Панина, 2001]. Этими зонами контролируется рельеф, абсолютные отметки которого увеличиваются с запада на восток. Так, самая западная, так называемая Усть-Кубанская слабая зона отделяет шельф Азовского моря и от Западно-Кубанской впадины (рис.1.7.1.). Восточнее следует Новороссийская, которая служит границей низкой, испытывающей наибольшее прогибание, равнинной области и более приподнятой. Параллельно ей выявлена Дивноморская слабая зона, которая разделяет блоки рельефа разной амплитуды в области склона Большого Кавказа и продолжается в область Западно-Кубанской впадины. Севернее она сливается с Краснодарской слабой зоной, отделяющей область низкой равнины от повышенной. Расположенная восточнее Усть-Лабинская слабая зона следует вдоль границы между Западно- и Восточно-Кубанской впадинами, которые отличаются абсолютными отметками, степенью расчленения и интенсивностью проявления новейших движений. Майкопская слабая зона выражена пологим уступом в пределах высокой равнины и разграничивает области умеренной и значительной денудации.

Наиболее ярко поперечная зональность проявляется в горной части Кавказа, где некоторые из поперечных зон (Геленжикская, Туапсинская, Пшехско-Адлерская, Новоафонская) описаны ранее как поперечные флексуры [Милановский, 1968]. С этими флексурно-разрывными зонами связаны эпицентры землетрясений. Для Анапской, Пшехско-Адлерской зон по решению механизмов очагов землетрясений установлена взбросово-сдвиговая кинематика [Юнга, 1996]. Продолжение Пшехско-Адлерской зоны разломов область Скифской плиты, в зоне Новотитаровского разлома также маркируется 5-7-балльными землетрясениями [Шебакин, 1974]. Многие из поперечных зон разрывов северо-восточного простирания имеют длительную, мезозойскую историю развития. Они контролировали распределение фаций и мощностей отложений в горной части Кавказа [Вишневский, Панина, 1987].

Элементы многих новейших структур наследуют древние дислокации фундамента и мезозойско-кайнозойского чехла. Сравнение новейшего структурного плана с палеозойским выявило тенденцию развития района на новейшем этапе – втягивание структур Скифской плиты в процесс воздымания на фоне сокращения впадин (Западно-Кубанской, Терско-Каспийской, Западно- и Восточно-Манычской, Кропоткинской и др.).

Унаследованное развитие испытывают палеозойские структуры первого ранга: Ставропольское, Сальско-Манычское поднятия, Прикумско-Тюленевский, Каневско-Березанский, Азовский валы, Ростовский выступ. Фрагменты протяженных зон разломов и, главным образом, их простираия также реанимируются на новейшем этапе. Так, например, Южно-Манычская зона разрывов, которая пересекает глубинные структуры до поверхности Мохоровичича, находит свое отражение и в новейшей структуре.

Согласно интерпретации кривых тектонических движений большая часть Скифской плиты начала втягиваться в воздымание, начиная с позднего сармата – понта [Панина, Костенко, 2005]. Эта тенденция отмечается и на картах современных вертикальных движений. Результаты повторного нивелирования за последние 70-100 лет убедительно показывают, что центральный сегмент Скифской плиты (Ставропольское и Сальско-Ергенинское поднятия) испытывали воздымание со скоростью 2 – 4 мм в год. В то же время восточная часть Терско-Каспийской и Терско-Кумской впадин, а также западная периферия Западно-Кубанской впадины втянуты в прогибание, скорости которого составляли 2 мм в год. Следует отметить, что согласно инструментальным наблюдениям последней четверти двадцатого века распределение областей поднятий и прогибаний Скифской плиты в целом соответствует описанным выше новейшим структурам, и отражают тенденцию усиления роста поднятий и их разрастания на фоне сокращения впадин [Лилиенберг и др., 1997].

Новейшая геодинамика Скифской плиты

С целью выявления тектонических процессов, которые реализуются через иерархическую систему полей напряжений и деформаций, воздействующих на неоднородную, структурированную среду, было проведено тектонофизическое, точнее аналоговое моделирование, в основу которого положена структурно-геологическая модель. Последняя деформируется в соответствии с существующими геодинамическими обстановками и условиями различного нагружения. В нашем случае такой моделью служил палеозойский фундамент Скифской плиты, испытывающий на современном этапе субмеридиональное сжатие со стороны растущего орогена Большого Кавказа. Тектонофизическое моделирование было дополнено автоматизированным анализом рельефа дневной поверхности с помощью программы «LESSA».

Тектонофизическое моделирование

Тектонофизическое моделирование предполагает использование эквивалентных материалов со структурой, близкой или аналогичной природному объекту. Экспериментальное воспроизведение в лабораторных условиях природных ситуаций и тектонических особенностей геологических объектов ограничено целым рядом факторов,

среди которых не только различие в свойствах модельных материалов и естественных пород, в величинах и способах нагружения, в скоростях деформации, но и, самое главное, во времени релаксации напряжений. Для преодоления этого, в тектонофизическом моделировании принято использовать коэффициенты подобия, введение которых, однако, не снимает проблему полностью, так как нельзя учесть все природные параметры деформационного процесса. Именно поэтому все чаще экспериментаторы обращаются к так называемому аналоговому моделированию.

Аналоговое тектонофизическое моделирование позволяет оценивать деформационный процесс на качественно-кинематическом уровне. Наиболее выигрышной стороной этого подхода является возможность воспроизведения конкретных тектонических структур, в том числе и регионального ранга; наблюдения за кинематикой движений; зарождением и формированием важнейших составных элементов структуры по мере развития деформации. Главным, как показывает опыт, является характер нагружения экспериментального образца, который задается, исходя из известных или предполагаемых геодинамических обстановок для конкретного природного геологического объекта или для определенной геомеханической ситуации. При этом подбирается или варьируется условный тип поведения материала – вязкопластичный, хрупкопластичный, хрупкий, упругий.

Существенно то, что в модели по аналогии с природной ситуацией изначально можно задать крупнейшие неоднородности в виде «нарезки» на блоки разной конфигурации, ориентировки, размера и реологических свойств (плотности, вязкости, упругости) [Белоусов, Гончаров, 1991]. После деформации оцениваются возникающий структурный рисунок, характер и пространственное расположение отдельных структурных элементов, кинематика движений, которые сравниваются с соответствующими природными данными. Это дает некоторые ориентиры для более правильного понимания и интерпретации природных структур и приближает к пониманию роли внешней нагрузки, характера исходной структурированности объема и картины распределения напряжений в нем. При этом характер и способ нагружения моделей должны быть схожими с природными.

В основу модели тектонофизического моделирования был положен разрывно-блоковый структурный план фундамента Скифской плиты, представляющий собой сочетание прогибов, впадин, валов, выступов, ограниченных зонами субширотных и субмеридиональных глубинных разломов. В качестве модельного материала использована глина, которая представляла условно комплекс пород фундамента. Глина была нарезана на блоки в соответствии со структурой фундамента. Размеры модели из глины составляли 20

х 32 х 4 см. Сжатие было встречное, двухстороннее, в направлении север-северо-восток – юг-юго-запад (поперечное к простиранию Кавказа). Максимальное сокращение модели достигало 15% от первоначального поперечного размера.

При моделировании использовали маркеры в виде кругов сантиметрового диаметра, их наносили на границы блоков и на межблоковые узлы, либо равномерно по поверхности (рисунок 1.7.2.). По их смещениям или по изменению исходной формы оценивали кинематику перемещений, величину и ориентировки главных осей деформации в разных частях модели. Процесс деформации и его результаты постадийно фиксировались цифровой фотокамерой и в дальнейшем обрабатывались с помощью редактора компьютерной графики и в геоинформационной системе ArcMap. В результате проведенного моделирования в исходной разрывно-блоковой структуре активизировались направления, по которым прошли сдвиговые смещения разной амплитуды и знака. Амплитуды смещений составляли миллиметры и изменялись на небольших расстояниях от 0.5 мм до 4 мм. Наряду с участками разломов, где наблюдались движения по ним, были обнаружены направления и зоны, находившиеся в компрессионном состоянии без существенных перемещений. Находились и так называемые закрытые для деформации участки, где не произошло заметного изменения формы исходно круглого маркера.

Изменение ориентировок осей эллипсоида деформации свидетельствует о вращении блоков против или по часовой стрелке в зависимости от их формы, положения в общей структуре и простирания их внешних границ, находившихся в различных условиях нагружения. Это указывает на дифференцированный характер движения блоков и неоднородность проявления активизации среды при внешнем нагружении объема. Можно выделить динамически активные направления и узлы в разрывно-блоковой структуре и области, почти не затронутые деформацией, а также участки, находящиеся в компрессионном состоянии, и зоны явного растяжения или декомпрессии.

Таким образом, моделирование позволило выявить подвижки по зонам разломов фундамента, ограничивающие крупные блоки, как правило, со сдвиговой компонентой. При этом амплитуды и направления движений вдоль разломов меняются от места к месту, затухая на отдельных участках. В целом север-северо-западные разломы имеют правосдвиговую составляющую, север-северо-восточные — левосдвиговую, в субкавказских зонах разломов сдвиговая составляющая выражена хуже. Определение осей деформаций показало, что оси сжатия имеют субмеридиональное направление, а растяжения – субширотное (рисунок 1.7.3.). Вместе с тем, траектории осей изменяют свое направление, особенно на западе и востоке района, повторяя конфигурацию Кавказского орогена. Это обстоятельство может указывать на то, что Скифская плита, а точнее ее

блоковая делимость, определяет конфигурацию орогена Большого Кавказа [Зайцев, Панина, 2011].

Рисунок 1.7.2. Аналоговая тектонофизическая модель деформаций фундамента Скифской плиты

Сравнение новейшего структурного плана и фундамента Скифской плиты показало, что новейшие дислокации во многом наследуют, главным образом, крупные положительные структурные элементы фундамента – своды, валы, выступы, существенно разросшиеся к современной эпохе, что отражено на карте неотектоники, описанной выше. Вместе с тем, впадины фундамента существенно сократились в размерах и "заросли" частными поднятиями. Наследуются крупные разломы фундамента: Ахтырский, Владикавказский, Манычский. Большая часть разломов фундамента отражается в новейших структурах лишь на отдельных участках. Обращает на себя внимание неодинаковый характер и величина деформаций фундамента в различных блоках. Наиболее деформированной оказалась область субкавказского простираня в центральной части Скифской плиты. Она включает Ростовский выступ на западе, северную часть района Ставропольского свода центрального сегмента Скифской плиты, Прикумско-Тюленевский вал, Маныч-Гудилковский прогиб, восточную часть вала Карпинского и Астраханский выступ на юго-востоке Прикаспийской впадины (рисунок 1.7.4.).

Рисунок 1.7.3. Ориентировка осей деформаций фундамента Скифской плиты

Рисунок 1.7.4. Величина деформаций фундамента Скифской плиты

Сопоставление результатов моделирования с характеристиками рельефа

Направление поля напряжения и локальную степень сжатия, полученные в модели, сравнивали с ориентационными характеристиками рельефа, которые рассчитывались программой LESSA по данным SRTM [Златопольский, 2011]. Рассматривался участок 995 км на 1260 км, с разрешением 90 м/пикс. Автоматически выявлялись линии хребтов, долин (будем называть их штрихи) и рассчитывалась их статистика в скользящем окне — общая плотность штрихов, плотность штрихов каждого направления, «розы-диаграммы» распределения штрихов по направлению, степень и направление вытянутости роз-диаграмм, линии вытянутости, которые показывают, как изменяется направление вытянутости роз-диаграмм по территории и др.

Схема поля напряжения фундамента сопоставлялась с построенными программой LESSA картами ориентировки и величины вытянутости роз-диаграмм рельефа дневной поверхности (рисунок 1.7.5). Сходство модели оценивалось на качественном уровне.

Картина осей сжатия и растяжения фундамента, вытянутых в «кавказском» (запад – северо-западном) направлении сравнивалась с линиями вытянутости рельефа. Выделяется два основных максимума степени вытянутости роз-диаграмм в центре Скифии, что в целом совпадает с тектонофизической моделью, на которой также присутствуют два основных максимума (рисунок 1.7.6).

Изменение параметров анализа рельефа не меняет общую картину. Наиболее высокая степень корреляции наблюдается при следующих параметрах расчета – разрешение 1.2 км/пикс и окно 115 км. То, что картина линий вытянутости и степени вытянутости в зоне Скифии, в целом, сходна для элементов рельефа разного масштаба, говорит о надежности результата этих исследований [Зайцев и др., 2013].

Сравнение результатов моделирования с современной геодинамикой

Выявленные закономерности деформации фундамента Скифской плиты сравнивались с проявлениями современной геодинамики. Геодинамическая активность зон максимальных деформаций фундамента подчеркивается приуроченностью эпицентров землетрясений к наиболее протяженным зонам разрывов (Каталог землетрясений). Среди них Армавирская зона разрывов, зарождающаяся в области горно-складчатого сооружения Большого Кавказа и следующая субмеридионально, пересекая практически все структуры Скифской плиты до Цимлянского водохранилища. В северной части Ставропольского поднятия на эту зону проецируется эпицентр сейсмического события 1969 г. Восточнее Армавирской, к параллельной Калаусской зоне, тяготеют землетрясения 1999 г и 2006 гг. с магнитудами соответственно 4.1 и 4.4.

Рисунок 1.7.5. Схема сопоставления линий вытянутости рельефа с осями деформаций фундамента Скифской плиты

Рисунок 1.7.6. Параметр анизотропии рельефа – «степень вытянутости роз-диаграмм» рассчитанный для Скифской плиты

Эпицентры землетрясений часто выстраиваются вдоль протяженных Краснодарской, Усть-Лабинской зон субмеридионального простирания. Сейсмически активными являются и зоны разрывов субширотного (запад-северо-западного

простираются): Новотитаровская, Армави́ро-Невинномысская, Южно-Маны́чская, Акшибай-Ергенинская, а также сейсмические события приурочены к областям пересечения субмеридиональных и субширотных зон. Землетрясениями маркируются растущие поднятия Терской и Сунженской зон дислокаций, периферии Ставропольского, Ногайского и др. Решения фокальных механизмов также близки по ориентировке к осям сжатия и растяжения, полученными при тектонофизическом моделировании (рисунок 1.7.7).

Один из показателей геодинамической активности – повышенный тепловой поток. Согласно [Pollack et.al., 1991] в центральной части наиболее деформированной зоны фундамента линии теплового потока вытянуты субмеридионально, а их максимальные значения приурочены к Ставропольскому поднятию, центральной части Манычской впадины и югу Сальско-Ергенинского поднятия. По геофизическим данным здесь существует положительная мантийная аномалия, имеющая субмеридиональное простирание и разделяющая Скифскую плиту на западную и восточную области [Егорова, Старостенко, 2006].

Косвенным доказательством роста новейших поднятий в геодинамически активной зоне является и нахождение здесь максимальных значений плотностей линеаментов разных направлений, отдешифрированных на космических снимках «Landsat7-ETM». Для количественной оценки распространения линеаментов подсчитывалась плотность (густота) линеаментов (м/км^2) в скользящем окне 115 км. Отметим согласованность областей максимальных значений деформации фундамента и максимальных значений плотности линеаментов (рисунок 1.7.8.).

Максимальные значения плотностей линеаментов приурочены на западе к Крыловскому, Батайскому и Выселковскому новейшим поднятиям. Повышенными значениями плотностей линеаментов характеризуется также северная область Ставропольского, восточная часть Прикумского (Прикумско-Тюленевский вал), а также южный склон Сальско-Ергенинского новейшего поднятия (восточная часть вала Карпинского), что указывает на активный их рост и подтверждается инструментальными наблюдениями [Лилиенберг и др., 1997].

Таким образом, наблюдается явное соответствие максимумов плотностей линеаментов и растущих новейших поднятий, сосредоточенных в геодинамически активной зоне фундамента. Эти наиболее деформированные области обладают повышенными значениями теплового потока и сейсмичностью, что свидетельствует об их активизации.

Рисунок 1.7.7. Схема сопоставления величины деформаций фундамента Скифской плиты с характером распределения сейсмичности

Рисунок 1.7.8. Карта плотности линеаментов, отдешифрированных на космических снимках Landsat7

Влияние новейшей геодинамики на распределение месторождений нефти и газа

Прикладным аспектом проведенных исследований явилось обнаружение взаимосвязей активных структур и месторождений нефти и газа. Максимальные скопления месторождений концентрируются в области сближения Ставропольского, Прикумского и Ногайского новейших поднятий в восточном сегменте Скифской плиты. Большинство месторождений приурочено к новейшим поднятиям Терской и Сунженской зон дислокаций Терско-Каспийской впадины. Серией нефтяных и газово-нефтяных месторождений подчеркивается зона Ахтырского разлома на границе Западно-Кубанской впадины и орогена Большого Кавказа. Многочисленные месторождения газа располагаются в области Выселковского, Крыловского, Батайского и Ставропольского новейших поднятий, в то время как нефтяные и газово-нефтяные залежи тяготеют к Прикумскому, Ногайскому, Южно-Ергенинскому и к ряду частных поднятий в пределах Прикаспийской впадины. Следует отметить, что газовые месторождения тяготеют к центральной, наиболее нарушенной слабыми зонами области Скифской плиты, в то время как нефтяные тяготеют к менее деформированным периферическим участкам. Это может указывать на миграцию газа в условиях активизации структур на новейшем этапе развития. Пути миграции могут служить зоны разрывов и трещиноватости горных пород, которые сопровождают рост поднятий.

Таким образом, проведенные структурно-геоморфологические исследования, дополненные анализом кривых тектонических движений с использованием методики back-stripping, позволили во многом по-новому представить новейший структурный план Скифской плиты. Современный структурный рисунок Скифской плиты – сочетание разноранговых разрастающихся поднятий и узких редуцированных впадин преимущественно субширотного простирания, нарушенных «слабыми зонами» субкавказской и субмеридиональной ориентировок. Сопоставление последних с разрывными нарушениями разных структурных планов, установленными геолого-геофизическими методами, позволяет с большой долей уверенности говорить о тектонической природе выявленных дислокаций и считать слабые зоны разрывными нарушениями.

Результаты тектонофизического моделирования показали, что формирование новейшей структуры Скифской плиты происходит в обстановке субмеридионального сжатия, единой с горным сооружением Большого Кавказа. На единство указывает и сходство структурных рисунков новейших дислокаций и корреляционные связи тектонических событий Кавказского орогена и Скифской плиты. Следует отметить, что в

разных блоках фундамента траектории осей напряжений могут изменяться. Исходя из общей геодинамической ситуации региона северо-западные (субкавказские) простирания являются, по-видимому, структурами сжатия (взбросами и надвигами),

северо - восточные (субмеридиональные) отражают обстановки растяжения и могут интерпретироваться как раздвиги и сбросы. И те и другие осложнены сдвиговой составляющей.

Выявленные новейшие дислокации развиваются в контексте с тектоническими процессами и событиями, происходящими в области горного сооружения Большого Кавказа, который разрастается, захватывая территории Скифской плиты и вовлекая ее в процесс поднятия. Воздымание последней выражается в зарастании ее поднятиями на фоне сокращения впадин. При этом реанимируются и частично наследуются как крупные пликативные структуры, так и фрагменты протяженных зон разломов фундамента преимущественно северо-западного (субкавказского) и субмеридионального простираний. Об активизации деформаций в наиболее геодинамически активных областях Скифской плиты, особенно в ее центральной части, свидетельствуют проявления современных тектонических процессов – вертикальных и горизонтальных движений, сейсмичности, повышенного теплового потока; здесь же отмечена максимальная концентрация газовых месторождений.

Трехмерное геодинамическое моделирование

С целью оценки упругих и пластических деформаций Скифской плиты было проведено трехмерное геодинамическое моделирование, выполненное с помощью специализированного модуля RMFracture – инструмента программного комплекса IrapRMS компании ROXAR.

Использование данной технологии предоставляет возможность интегрировать разнообразную структурно-геологическую информацию для того, чтобы построить цифровую модель трещиноватости (Discrete Fracture Network), а затем методом «двойного пространства» спрогнозировать фильтрационно-емкостные свойства пород. В том случае, если трещины имеют значительную густоту и степень раскрытости, их влияние на величину флюидной проницаемости будет определяющим.

В программном продукте RMS Roxar была создана компьютерная структурно-геологическая трехмерная модель и проведена оценка фильтрационно-емкостного пространства, которая позволила выявить благоприятные области для эманаций водорода в пределах центрального и восточного Предкавказья. Методика построения геодинамической модели рассматриваемой территории основана на построении интегрируемой пористой среды с развитой трещиноватостью, где параметры трещин зависят от геолого-

геодинамических факторов. Несмотря на принципиальную невозможность определить параметры каждой трещины, такие характеристики, как плотность трещин, их ориентировка, могут быть предсказаны с помощью тектонофизических методов или трендов. Напряженное состояние рассматриваемой территории было рассчитано с помощью упругой конечно-элементной модели (Elastic Stress), реализованной в программном модуле RMSFracture. Данный метод позволяет сравнительно точно описывать возможные контактные взаимодействия, в том числе при больших деформациях с образованием складок, а также моделировать появление трещин в результате деформирования при заданных критериях разрушения. При этом, региональное поле напряжений рассматривается как граничное условие. В результате приложенной нагрузки происходит смещение по существующим разломам, что приводит к появлению локального поля напряжений. Основная цель такого (геомеханического) моделирования – установление локального поля напряжений и оценка его влияния на возникновение новых или изменение степени раскрытости существующих трещин. При этом реконструкция напряженно-деформированного состояния горного массива имеет первостепенное значение для прогноза проницаемости водорода.

По данным решений фокальных механизмов землетрясений, внешним, по отношению к рассматриваемой территории, является взбросовое поле напряжений с субмеридиональной (со стороны Кавказа) ориентировкой оси максимального сжатия. На этапе создания цифровой модели трещиноватости (Discrete Fracture Network) были рассчитаны шесть параметров, которые определяют появление новых трещин или изменение степени раскрытости существующих неоднородностей: кривизна структурной поверхности (антиформы), ориентировка трещин – MaxCurvatureDirection; кривизна структурной поверхности (синформы), близость к разломам – Fault Proximity, ориентировка трещин – Faultstrike; близость к концам разломов – FaultTipProximity, величина горизонтального смещения – DisplacementX, вероятность появления новых трещин – FractureLike, ориентировка трещин – Shmaxdir.

С помощью специального программного обеспечения Create Fracture Model создается основа для аналитической дискретной модели трещиноватости. В этой программе трещины генерируются случайным распределением «затравок» и создаются в соответствии с плотностью рассчитанных трендов и данными об их ориентировках. Трещины «выращиваются» до тех пор, пока не будет достигнута требуемая плотность. На следующем шаге моделирования оценивается влияние длины и изменчивости параметров трещин. Необходимо добиться наилучшего соответствия сети трещин геолого-геофизическим или эксплуатационным параметрам. Далее, после построения цифровой дискретной модели

трещиноватости, можно оценить сообщаемость полученной сети разломов и перейти к гидродинамическому моделированию, используя метод двойного пространства (двойных пористости и проницаемости).

В результате моделирования был выполнен расчет вторичной проницаемости территории центрального и восточного Предкавказья, выявлены и оконтурены места с высокими значениями данного параметра (рисунок 1.7.9). Под номерами 1-10 показаны наиболее проницаемые участки земной коры. Максимальные значения данного параметра были выявлены на юге исследуемой территории в районе г. Грозного, п. Эльхотово, г. Махачкалы. Аномально высокие значения вторичной проницаемости прогнозируются на участке, вытянутом в субмеридиональном направлении от г. Кизляра до г. Кочубея. В Ставропольском крае выявлено несколько зон высоких значений проницаемости. Все они простираются в субширотном, либо северо-восточном направлении. Отметим участок в районе п. Ипатово, который представляет собой область пересечения субширотных и субмеридиональных зон пересечения повышенных значений проницаемости, и участок в районе п. Арзгир, представляющий собой цепь пересекающихся аномалий субширотной и северо-восточной ориентировок. Соответственно все остальные области являются потенциально опасными участкам земной коры с точки зрения газовых эманацій.

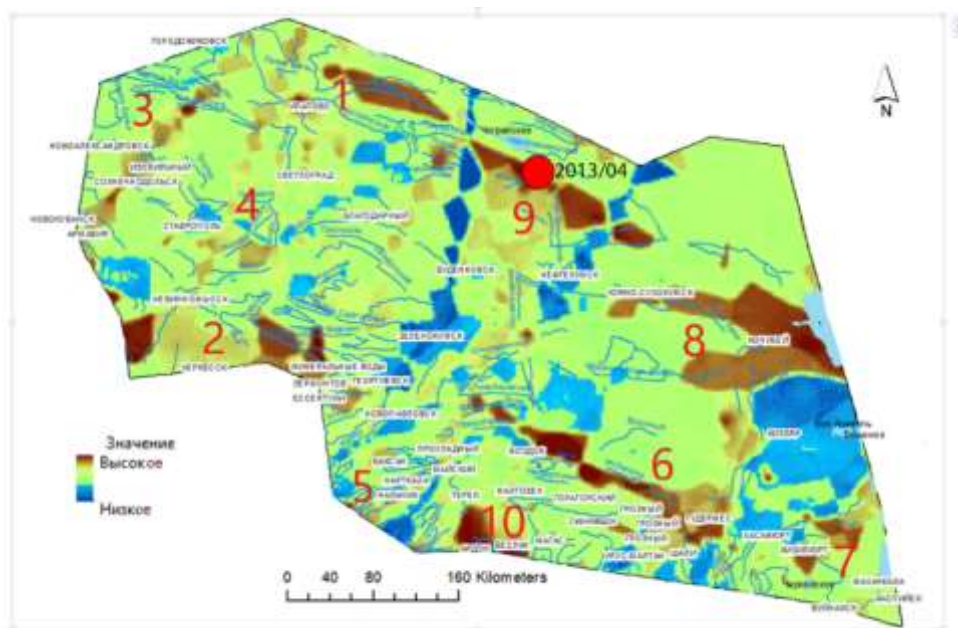


Рисунок 1.7.9. Карта степени вторичной проницаемости Центрального и Восточного Предкавказья.



2. Новые возможности комплексного анализа морфометрических характеристик рельефа, астрономических параметров и данных ГНСС для развития методов сейсмического прогноза по месту и времени

Одним из показателей активизации новейших и современных геодинамических процессов является сейсмичность. С целью выявления взаимосвязей сейсмичности с рельефом и корреляции событий с астрономическими данными и скоростями пунктов ГНСС в качестве объектов исследования были выбраны остров Сахалин, Алтае-Саянская область и район в радиусе 400 км от центра Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали.

Выделение сейсмоактивных участков по данным анализа рельефа

Для Сахалина установлена приуроченность эпицентров современных землетрясений к положительным аномалиям 7-ми морфометрических параметров рельефа, оконтуренных по значениям, превышающим медиану или 3-ий квартиль. В первом случае такие аномалии занимают половину площади острова, и в их пределы попадает более 50% эпицентров землетрясений, во втором — $\frac{1}{4}$ площади, на которую приходится более 25% эпицентров. К рассмотренным морфометрическим параметрам относятся: разность гипсометрической и базисной поверхностей 3-го порядка (1), разности базисных поверхностей 1-го и 2-го (2), 2-го и 3-го порядков (3), глубина вертикального расчленения рельефа (4), стандартное отклонение экспозиции склонов (5), плотность «слабых» зон (6), асимметрия высот (7) (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа и сейсмичности о-ва Сахалин

Параметр	Доля эпицентров землетрясений, попадающих в области, где значения морфометрических параметров превышают	
	медиану	3-ий квартиль
1	0.62	0.37
2	0.60	0.28
3	0.56	0.28
4	0.61	0.33
5	0.62	0.29
6	0.62	0.45
7	0.53	0.31

Примечание: номера морфометрических параметров рельефа указаны в тексте

В определенной степени они отражают степень мегатрещиноватости геосреды.

Два наиболее информативных параметра — асимметрия высот морфоструктур и плотность «слабых» зон — обработаны γ -оператором нечеткой логики [Zimmerman, 1996]. Методика работы заключалась в преобразовании соответствующих морфометрических схем в нечеткое множество по следующей зависимости [Демидова, Лукичев, 2017; Tanaka, Asai, 1984]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - x_0}{x_m - x_0}, & x_0 \leq x < x_m \\ 1, & x = x_m \end{cases}$$

где x — значение функции принадлежности μ , x_0 — начальное значение диапазона, x_n — конечное значение диапазона, x_m — значение, при котором значение функции принадлежности максимально. Для анализа морфометрических характеристик рельефа были использованы нечеткая сумма:

$$\mu_{\text{Summ}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

и нечеткое произведение:

$$\mu_{\text{Prod}} = \prod_{i=1}^n \mu_i,$$

которые используются для анализа γ -оператором нечеткой логики:

$$\mu(x) = (\mu_{\text{Summ}})^\gamma \times (\mu_{\text{Prod}})^{(1-\gamma)},$$

где γ — параметр, варьирующий от 0 до 1. Если значение γ стремится к 0, то результат будет стремиться к нечеткому произведению, если γ стремится к 1, то будет приближаться к нечеткой сумме. Нами были опробованы значения $\gamma=0.25, 0.5, 0.75$ и 0.9 . Эмпирически установлено, что при $\gamma=0.9$ схема степени принадлежности, которую можно обозначить как схему интегрального морфометрического параметра S , наилучшим образом согласуется с данными о распределении эпицентров землетрясений по площади. Наряду с данными о конфигурации активных разломов и результатами компьютерного геодинамического моделирования она была использована для выделения 11-ти зон ВОЗ (рисунок 2.1).

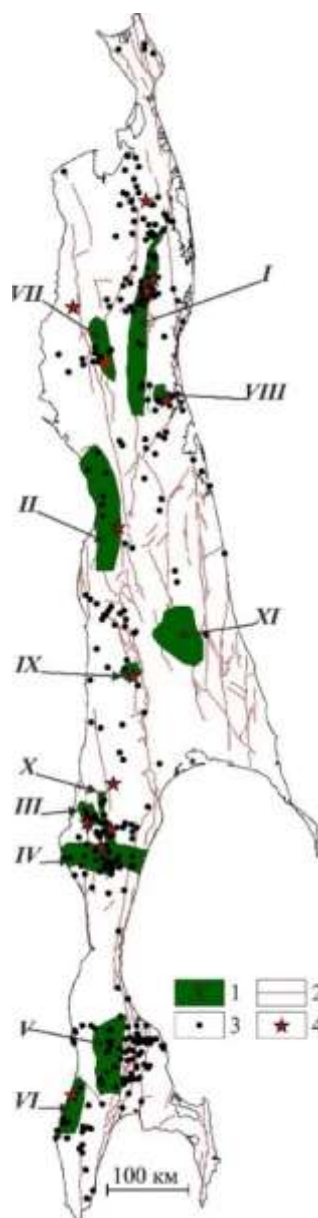


Рисунок 2.1. Схема зон ВОЗ о-ва Сахалин, по [Sobisevich et al., 2024]: 1 – зоны ВОЗ и их номера, 2 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022], 3–4 эпицентры землетрясений с магнитудой по поверхностным волнам (M_s): 3 – $M_s < 5.5$, 4 – $M_s \geq 5.5$

Аналогичный результат получен для Алтае-Саянской области. Здесь коровые землетрясения с глубиной гипоцентра ≤ 45 км приурочены к положительным аномалиям 15-ти морфометрических параметров рельефа (таблицы 2.2, 2.3). Три наиболее показательных из них (разность базисных поверхностей 2 и 3 порядков, глубина вертикального расчленения рельефа и средняя высота) обработаны γ -оператором (рисунок 2.2). Оценка качества полученной модели была произведена с помощью ROC (receiver operating characteristic) анализа. Значения AUC (area under curve, площадь под кривой) составили 0.67 для всех эпицентров землетрясений и 0.80 для событий с $M_w \geq 5.5$ при максимально возможном значении AUC 1.0.

Таблица 2.2. Квартильные значения морфометрических характеристик рельефа Алтае-Саянской области

№	Параметр	Q1	Q2	Q3
1	Разность базисных поверхностей 1 и 2 порядков, м	5	34	120
2	Разность базисных поверхностей 2 и 3 порядков, м	3	33	119
3	Разность базисных поверхностей 3 и 4 порядков, м	2	38	133
4	Разность базисных поверхностей 4 и 5 порядков, м	4	44	136
5	Разность базисных поверхностей 5 и 6 порядков, м	-16	58	174
6	Разность гипсометрической и базисной поверхности 6 порядка, м	121	489	1067
7	Глубина вертикального расчленения рельефа, м	183	496	843
8	Наклон рельефа, °	1.65	4.22	8.77
9	Кривизна рельефа, взятая по модулю, $\times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$	10	25	53
10	Дисперсия глубины вертикального расчленения рельефа, м	21	47	77
11	Дисперсия наклона рельефа, °	1.31	2.88	4.24
12	Дисперсия высот, м	42	114	197
13	Средняя высота, м	405	1077	1740
14	Плотность водотоков, км^{-1}	19	20	22
15	Асимметрия высот	-0.1	0.2	0.6

Таблица 2.3 — Сопоставление квартильных значений морфометрических параметров рельефа с пространственным положением эпицентров землетрясений Алтае-Саянской области

№ параметра	Доля эпицентров землетрясений с магнитудой M , расположенных в областях, где значения морфометрических параметров рельефа превышают			
	медиану		третий квартиль	
	все значения M	$M \geq 5.5$	все значения M	$M \geq 5.5$
1	0.68	0.68	0.44	0.45
2	0.70	0.79	0.42	0.42
3	0.70	0.63	0.41	0.31
4	0.60	0.79	0.40	0.71
5	0.72	0.76	0.49	0.50
6	0.76	0.84	0.48	0.58
7	0.75	0.84	0.48	0.58
8	0.66	0.74	0.39	0.45
9	0.64	0.68	0.38	0.45
10	0.71	0.79	0.43	0.63
11	0.75	0.76	0.49	0.45
12	0.75	0.84	0.47	0.58
13	0.79	0.97	0.52	0.71
14	0.47	0.30	0.20	0.11
15	0.41	0.55	0.17	0.19

Примечание: № параметра соответствует приведенному в таблице 2.1.2.

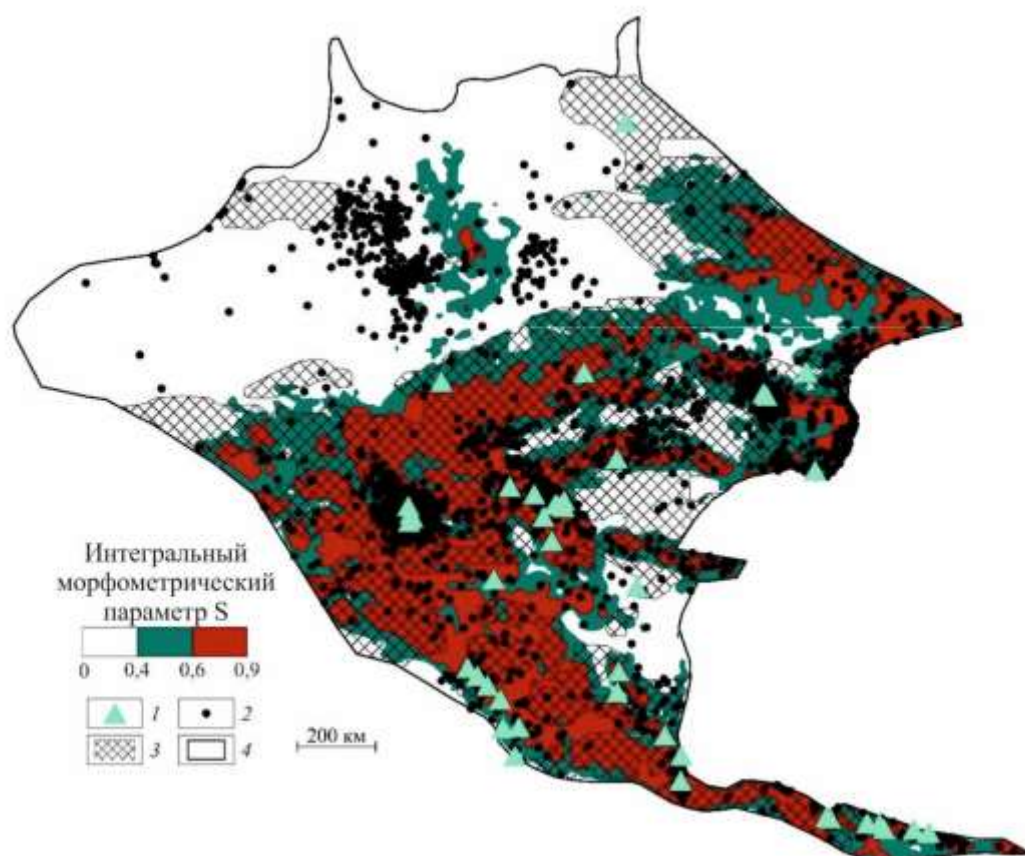


Рисунок 2.2. Сопоставление схемы интегрального морфометрического параметра S с распределением эпицентров коровых землетрясений Алтае-Саянской области по площади [Агибалов и др., 2024б]: 1–2 – эпицентры землетрясений с моментной магнитудой (M_w): 1 – с $M_w \geq 5.5$; 2 – с $M_w < 5.5$; 3 – области локализации максимальных напряжений, полученные с помощью компьютерного моделирования; 4 – границы Алтае-Саянской области

На примере района Северомуйского тоннеля показана равная информативность выделения сейсмоактивных участков по трем морфометрическим параметрам (глубине вертикального расчленения, асимметрии и эксцессу высот), обработанных γ -оператором нечеткой логики и методом равнозначных градаций, описанном в [Копылов, 2019]. Он заключается в пересчете значений морфометрических характеристик в баллы в зависимости от того, насколько они превышают среднее арифметическое и стандартное отклонение, а интегральный параметр S определяется как сумма баллов. На наш взгляд, такая градация неудобна из-за необходимости проверки каждого распределения на нормальность, поэтому лучше вместо среднего арифметического и стандартного отклонения использовать медиану, децили и квантили. В связи с этим в нашем случае 0 баллов соответствует значениям, меньшим, чем первый квантиль (Q_1), 1 балл – $\geq Q_1$ и $< Q_2$, 2 балла – $\geq Q_2$ и $< Q_3$, 3 балла — $\geq Q_3$. На ROC-диаграмме показано, что при использовании γ -оператора AUC составляет 0.79, а при расчете методом равнозначных градаций — 0.72 (рисунок 2.3). Близость значений AUC подтверждается приведенными в таблицах 2.4 и 2.5 данными.

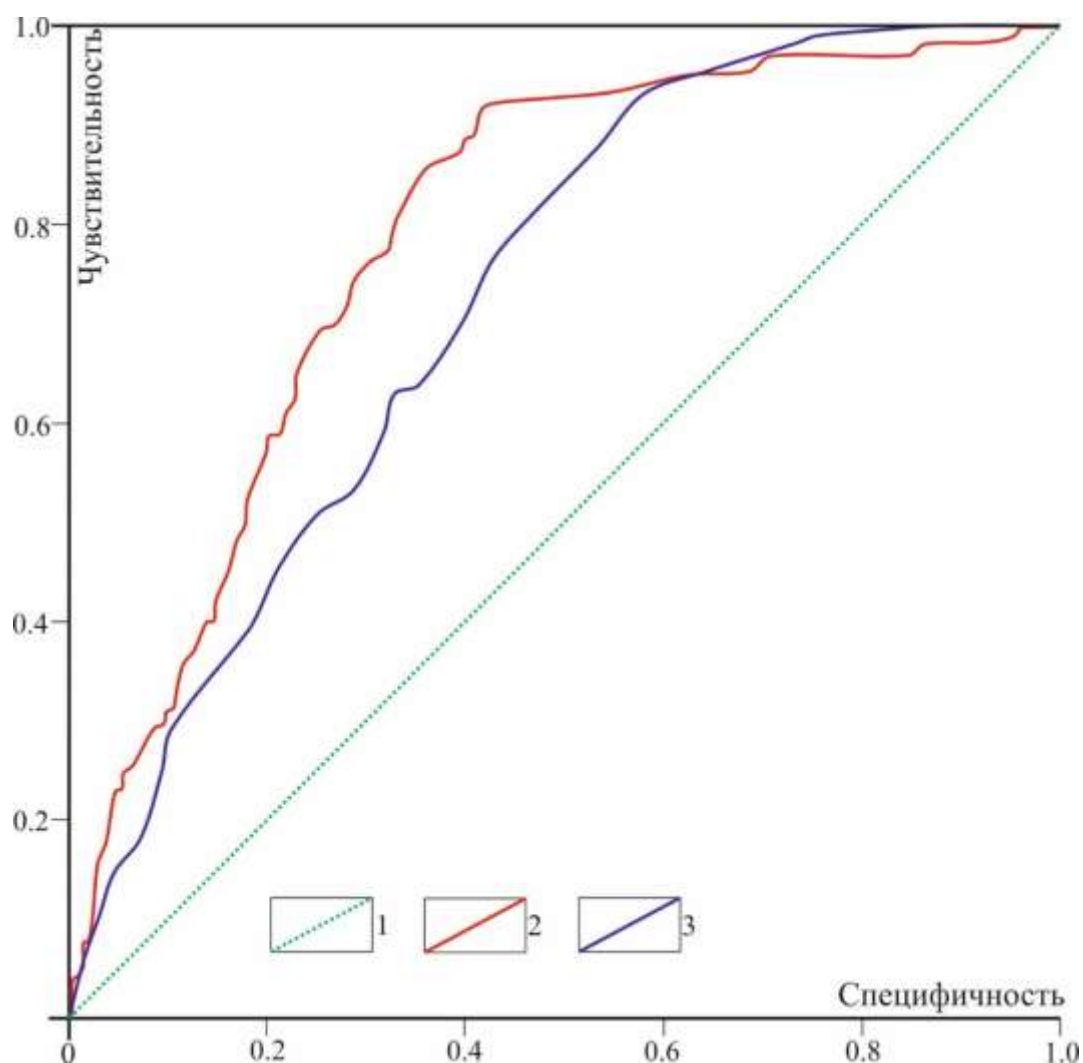


Рисунок 2.3 — ROC-диаграмма, показывающая достоверность результатов расчета интегрального морфометрического параметра S с использованием нечеткой логики и методом равнозначных градаций: 1 – линия случайного распределения, 2–3 – ROC-кривые, построенные для оценки достоверности результатов анализа морфометрических параметров: 2 – γ -оператором нечеткой логики, 3 – методом равнозначных градаций

Таблица 2.4. Доля эпицентров землетрясений, расположенных в областях повышенных значений интегрального морфометрического параметра S , рассчитанного методом равнозначных градаций

Значение интегрального морфометрического параметра S	Доля площади	Доля эпицентров землетрясений
≥ 4	0.65	0.94
≥ 5	0.36	0.71
≥ 6	0.12	0.33

Таблица 2.5. Доля эпицентров землетрясений, расположенных в областях повышенных значений интегрального морфометрического параметра S , рассчитанного с использованием нечеткой логики

Значение интегрального морфометрического параметра S	Доля площади	Доля эпицентров землетрясений
≥ 0.3	0.58	0.95
≥ 0.4	0.16	0.57

Временная взаимосвязь сейсмичности с астрономическими параметрами и данными ГНСС

Кроме того, выявлена высокая степень временной взаимосвязи сейсмичности и расстояния от Земли до Луны и Солнца: значительная часть землетрясений в районе Северомуйского тоннеля происходит при относительно малом значении этого параметра, что согласуется с общемировыми закономерностями [Федоров и др., 2022] и объяснимо усилением гравитационного воздействия на литосферу Земли (таблица 2.6).

Таблица 2.6 — Значения медианы (Q2), 1-го (Q1) и 3-го (Q3) квартилей расстояния Земля-Луна и Земля-Солнце в 2000-2024 гг.

Параметр	Кв артиль	Объект изучения		
		весь мир (N=9172)	землетрясения с Mw≥7, произошедшие во всем мире (N=369)	землетрясения района Северомуйского тоннеля (N=211)
Расстояние Земля – Луна, км	Q1	371121	371242	370191
	Q2	385845 [385199...386505]	385761 [381635...388281]	380638 [377917...387869]
	Q3	399929	399363	396494
Расстояние Земля – Солнце, а. е.	Q1	0.9883	0.9961	0.9851
	Q2	1.0000 [0.9997...1.0008]	0.9992 [0.9876...1.0115]	0.9937 [0.9899...0.9968]
	Q3	1.0120	1.0018	1.0109

Примечание: Q1 и Q3 — 1-ый и 3-ий квартили, Q2 — медиана; в квадратных скобках — 90%-ный доверительный интервал медианы, рассчитанный по [ГОСТ..., 2005]

В радиусе 300 км от станций ГНСС IRKJ (Иркутск) и BADG (Бадары) сейсмичность сопровождается увеличением горизонтальной скорости этих пунктов (таблица 2.7, рисунок 2.4).

Таблица 2.7 — Изменение скорости горизонтальных перемещений пунктов ГНСС IRKJ и BADG во время сейсмических событий

Пункт ГНСС	Скорость горизонтального перемещения, ×10 ⁻⁶ м/сут			N
	Q1	Q2	Q3	
IRKJ	827	1315 [1294; 1338]	1905	7339
	<u>1020</u>	<u>1585</u> [1135; 1838]	<u>2147</u>	109
BADG	898	1417 [1390; 1446]	2027	4641
	<u>1560</u>	<u>2089</u> [2089; 2130]	<u>2361</u>	86

Примечание: Q1 и Q3 — 1-ый и 3-ий квартили, Q2 — медиана; в квадратных скобках — 90%-ный доверительный интервал медианы, рассчитанный по [ГОСТ..., 2005], N — объем выборки. Подчеркнуты значения скорости, рассчитанные в те дни, когда происходили сейсмические события в районе пунктов IRKJ и BADG

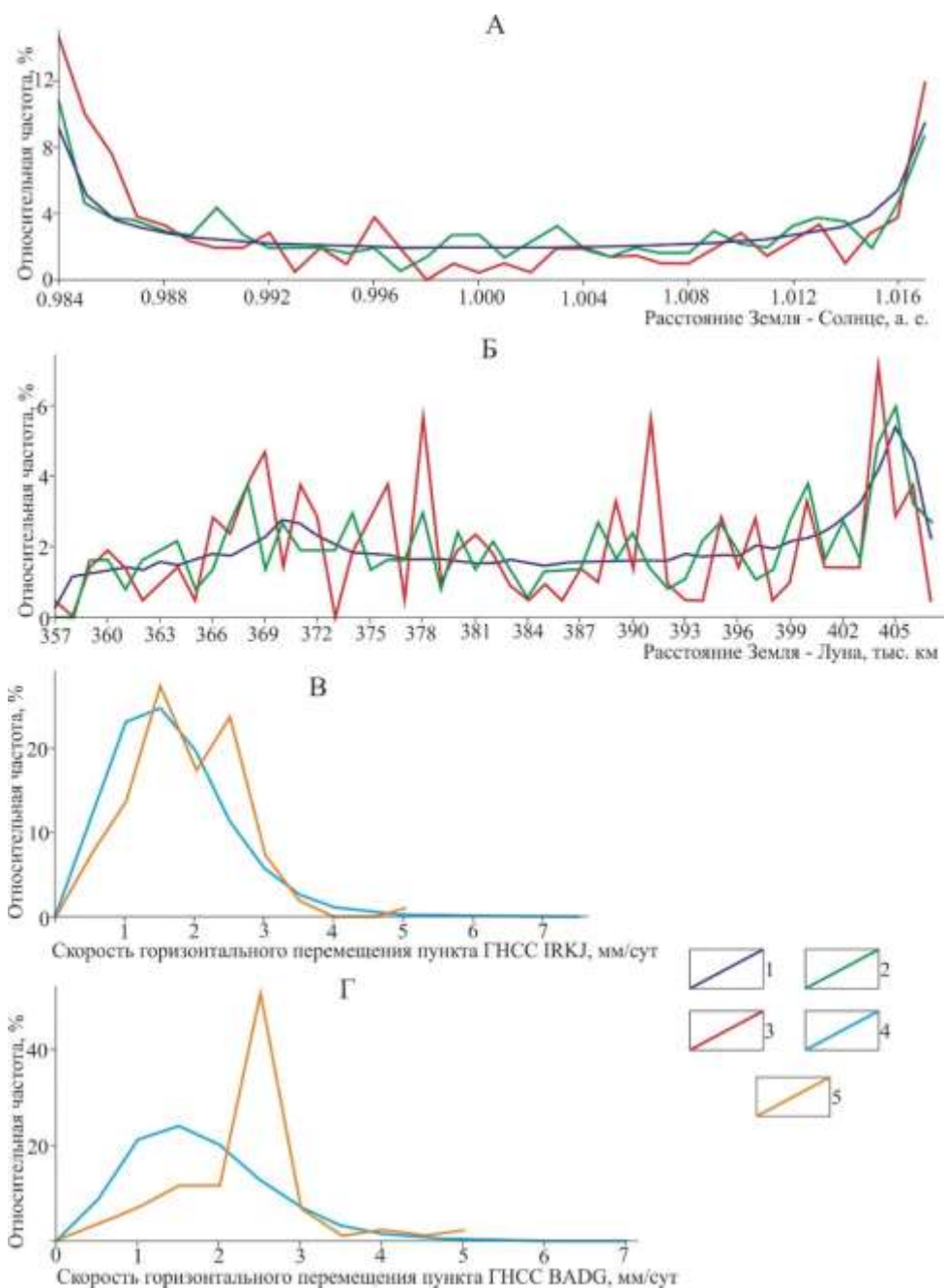


Рисунок 2.4. Графики частотного распределения расстояния Земля – Солнце (А) и Земля – Луна (Б), горизонтальной скорости пунктов ГНСС IRKJ (В) и BADG (Г): 1–5 – выборки, элементами которых служат значения показанных на графиках параметров, рассчитанных для: 1 – всего мира; 2 – землетрясений с $M_w \geq 7$, произошедших во всем мире; 3 – землетрясений района Северомуйского тоннеля; 4 – всего периода наблюдений на определенном пункте ГНСС; 5 – для землетрясений, произошедших в радиусе 300 км от определенного пункта ГНСС

Апробация разных алгоритмов расчета максимальной магнитуды ожидаемого землетрясения

Отдельное внимание было уделено апробации разных алгоритмов расчета максимальной магнитуды ожидаемого землетрясения (M_{max}) по разным эмпирическим формулам:

- 1) $M_{max} = 5.0 + 1.88 \lg(L) + 0.63 \lg(G) + 0.63 \lg(t_{ож})$ [Руководство..., 2018],
- 2) $M_{max} = 0.5 + M_{зарег}$ [Руководство..., 2018],
- 3) $\lg(L) = 0.5M_w - 1.92$, [Kanamori, Anderson, 1975],
- 4) $\lg(L) = (0.59 \pm 0.02)M_w - 2.44(\pm 0.11)$ [Wells, Coppersmith, 1994],
- 5) $\lg(L) = 0.43M - 1.27$ [Завьялов, Зотов, 2021],

где L — длина разлома (км), G — скорость деформаций (1/год), $t_{ож}$ — время ожидания (в годах), равное 50 лет (принято для срока службы объектов атомной энергетики), $M_{зарег}$ — максимально зарегистрированная магнитуда в пределах зоны ВОЗ, M_w — моментная магнитуда.

Для ранее выделенных нами зон ВОЗ Сахалина и Большого Кавказа наиболее достоверные результаты получены при использовании формулы [Wells, Coppersmith, 1994] (рисунки 2.5, 2.6).

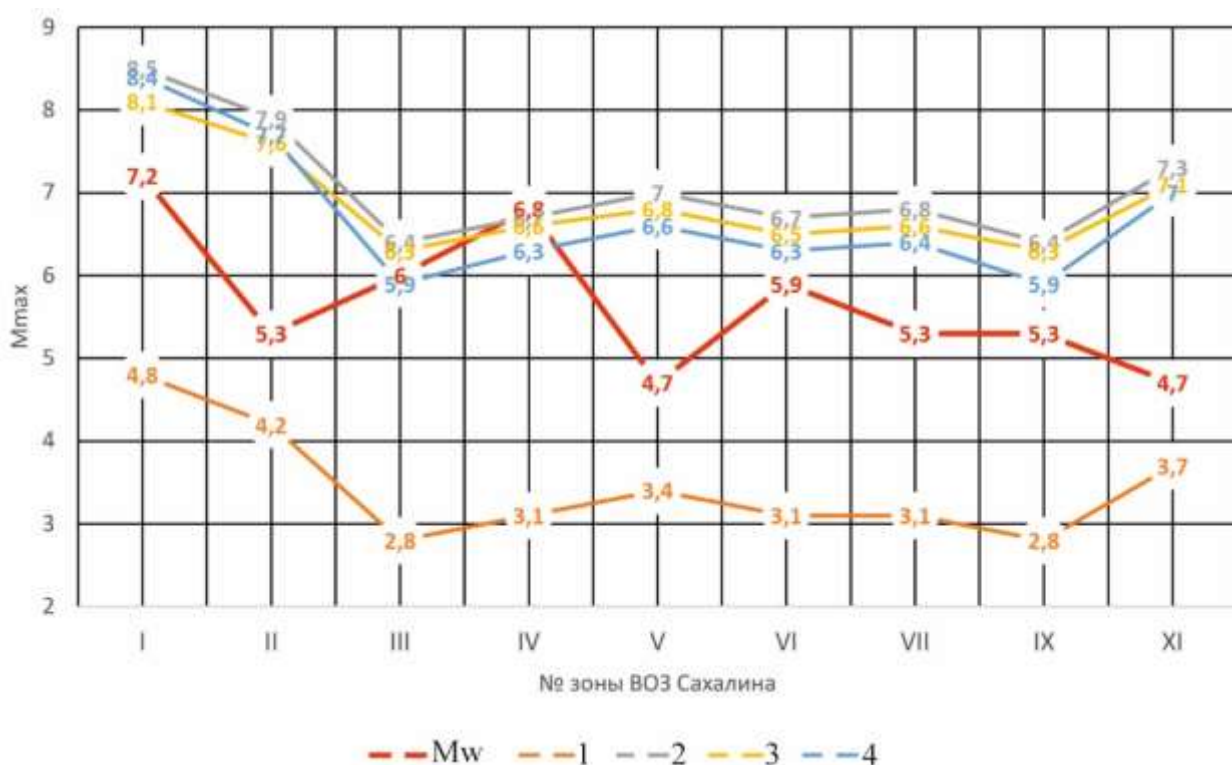


Рисунок 2.5. Максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения (M_{max}) в зонах ВОЗ Сахалина, рассчитанная по разным эмпирическим формулам [Агibalов и др., 2024a]: цифрами обозначены номера формул, M_w — моментная магнитуда

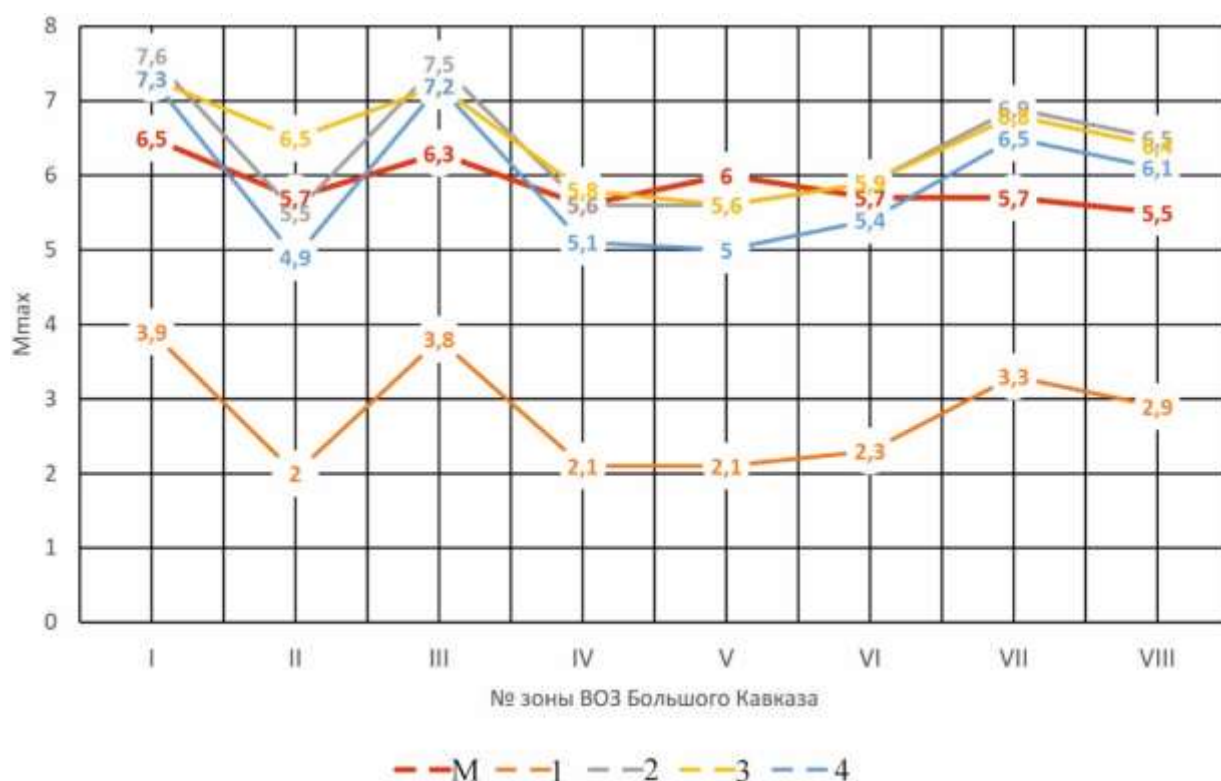


Рисунок 2.6. Максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения ($M_{\max}$) в зонах ВОЗ Большого Кавказа, рассчитанная по разным эмпирическим формулам [Агибалов и др., 2024a]: цифрами обозначены номера формул, M — магнитуда

Выводы

Для о-ва Сахалин, Алтае-Саянской области и района Северомуйского тоннеля установлена приуроченность эпицентров землетрясений к положительным аномалиям морфометрических параметров рельефа, характеризующих степень раздробленности геосреды.

Обработка этих параметров γ -оператором нечеткой логики или методом равнозначных градаций позволяет с высокой степенью достоверности выделять сейсмоактивные участки, при этом оба подхода в равной степени информативны.

Для района Северомуйского тоннеля установлено, что сейсмические события чаще всего происходят при малом расстоянии от Земли до Луны и Солнца, что объяснимо усилением их гравитационного воздействия на литосферу Земли, и сопровождаются увеличением скорости пунктов ГНСС.

На примере зон ВОЗ о-ва Сахалин и Большого Кавказа апробированы разные алгоритмы оценки максимальной магнитуды ожидаемого землетрясения. Наилучшая согласованность с реально зафиксированной магнитудой достигнута при использовании формулы [Wells, Coppersmith, 1994].

3. Модель современного напряжённого состояния и фильтрационные параметры Даниловского месторождения (Иркутская область)

При разработке большинства нефтяных и газовых месторождений необходимо учитывать наличие естественной трещиноватости продуктивных пластов. Решение данной проблемы особенно актуально, когда наблюдаются резкие изменения в работе близко расположенных друг от друга добывающих или нагнетательных скважин, за счет контрастных значений проницаемости коллектора. Рассмотренное в данной работе небольшое нефтяное месторождение, расположенное на севере Иркутской области, относится именно к таким структурам. При этом возникает необходимость определить, какая доля флюидного потока будет фильтроваться по трещинам, а какая по межзерновым порам (классический коллектор). В том случае, если трещины имеют значительную густоту и степень раскрытости, их влияние может быть определяющим для величины флюидной проницаемости пласта. При прочих равных условиях, распределение флюида в пределах природного резервуара определяется двумя факторами – степенью проницаемости горных пород и характером их напряженного состояния. Причем, напряженное состояние обуславливает не только направление и скорость миграции флюида, но и оказывает значимое влияние на величину проницаемости самих горных пород. Особо отметим, важность изучения именно современного поля напряжений определяющего тектоническую активность трещин.

Таким образом, главная цель исследования – создать трехмерную геомеханическую модель усть-кутского горизонта (V2) и оценить фильтрационные параметры коллектора, связанные с современной тектонической активностью данного месторождения. В стандартном методе двойного пространства все ячейки имеют двойные свойства. Первичная пористость и проницаемость, связанная с межзерновыми параметрами терригенного коллектора, изучается с помощью традиционных методов. Вторичная – с помощью специальных геофизических методов, позволяющих прогнозировать плотность, апертуру и ориентировку систем трещин. Исследуемое месторождение обладает именно таким, сложным коллектором. Это обстоятельство подтверждается множеством независимых фактов. Во-первых, значительным различием в производительности эксплуатационных скважин, зачастую расположенных недалеко друг от друга. Во-вторых, анизотропией фильтрационных параметров между скважинами, особенно ярко проявившуюся в результате трассирования фильтрационных потоков мечеными

жидкостями. В-третьих, высокой степенью статистической зависимости между дебитами скважин и структурными параметрами геологической среды.

Расчет вторичной или трещинной проницаемости выполняется с помощью программного модуля Dual-Porosity Modelling. Основные этапы технологии оценки вторичной флюидной проницаемости горных пород показаны на рисунке 3.1.

Итак, для оценки вторичной флюидной проницаемости необходимо с помощью геомеханической модели реконструировать поле тектонических напряжений, формирующих трещиноватость, построить вероятностную модель распределения трещин и рассчитать трещинную проницаемость.

В данной работе реализована технология оценки вторичной флюидной проницаемости горных пород с помощью программного комплекса IrapRMS компании ROXAR. В результате выполненных исследований было установлено, что изучаемая территория испытывает современное сдвиговое поле напряжений, с юго-западной ориентировкой оси максимального сжатия (Зайцев, 2015; Зайцев, 2017; Керимов, 2016).



Рисунок 3.1. Технология оценки вторичной флюидной проницаемости горных пород

С помощью геомеханической модели, построенной методом граничных элементов (Elastic Stress), удалось установить шесть параметров, определяющих появление новых или изменение степени раскрытости существующих трещин. Это – величина и ориентировка максимальных касательных напряжений, вероятность появления новообразованных

трещин, перемещения, рассчитанные по трем осям X, Y, Z, плотность трещиноватости, выявленной с помощью специального сейсмического атрибута Stochastic Enhanced CC.

Используя данные параметры, была построена аналитическая модель трещиноватости с помощью программного модуля «Fracture modelling». Далее, используя метод двойного пространства, было построено распределение трещинной проницаемости и проведено сопоставление полученных данных с добычными характеристиками 6-ти скважин. Сравнение трещинной и поровой проницаемости показало, что эти данные существенным образом дополняют друг друга.

Построение 3D геомеханической модели

На первом этапе работ необходимо установить современную ориентировку внешнего сжатия и тип напряженного состояния. Использование структурных особенностей (ориентировка древних разрывных нарушений) или результатов волнового акустического каротажа (аппаратура АВАК) дает нам представление о поле тектонических напряжений, предшествующих новейшему геологическому этапу. В данной работе нас больше интересует современное поле напряжений, определяющее современные фильтрационные процессы. Как показывает геологическая история Иркутского региона, современное поле напряжений отличается от древнего (по-видимому, триасового (?) возраста). Общие представления о современном поле напряжений дает анализ сейсмичности территории, в частности, использование решений фокальных механизмов землетрясений. Сам факт наличия эпицентров землетрясений говорит о современной активности региона, а о характере напряженного состояния можно судить по нодальным плоскостям механизмов очагов и ориентацию главных осей напряжений растяжения (T) и сжатия (P), под действием которых и происходит подвижка.

Байкальская рифтовая зона зародилась на месте Саяно-Байкальского сводового поднятия под действием активных тектонических движений, начавшихся в эоцене-олигоцене и продолжающихся в настоящее время. Черты современного напряженно-деформированного состояния в Байкальской рифтовой зоне были установлены благодаря массовому изучению фокальных механизмов, начавшемуся во второй половине 60-х годов.

Таким образом, современное напряженное состояние юга-восточной части Сибирской платформы связано с растущим под Байкалом поднятием, которое вызвало в осевой части растяжение северо-западной ориентировки, при субвертикальным положении оси сжатия, которое по мере удаления от Байкала сменяется на северо-западное сжатие. Местоположение рассматриваемого месторождения соответствует именно этому характеру напряженного состояния. Тем не менее необходимо убедиться в правильности выбора ориентировки внешнего сжатия и выбора типа напряженного состояния. Для решения этой

задачи программный модуль RMSFracture программы IrapRMS предоставляет пользователю инструмент, с помощью которого можно оценить комплекс геодинамических параметров таких как: вертикальные и горизонтальные перемещения в модели (Displacement X,Y,Z), значения максимальных и минимальных касательных напряжений (Shmax, Shmin), вероятность появления новообразованных трещин (Fracture Likelihood) и др. Для расчёта горизонтальных напряжений необходимо учитывать статический модуль Юнга и статический коэффициент Пуассона. В нашей модели были использованы данные, приведенные в материалах АО «Центральная геофизическая экспедиция» (АО «ЦГЭ»). В частности, в данном отчете приведены результаты исследования прочностных свойств пород (трёхосное сжатие) и сопутствующие расчеты статических свойств пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), выполненные с помощью кернового материала компанией ООО «Арктик-ГЕРС» по скважинам 302, 305 (общее количество образцов 34 шт.). В представленной геомеханической модели использовались средние значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Задавая различные ориентировки внешнего поля напряжений и типов приложения нагрузок можно получить все возможные распределения указанных выше параметров. Затем необходимо сопоставить полученные данные с добычными параметрами скважин и выбрать тот вариант нагружения, который будет статистически наиболее тесно с ними связан. Моделирование проводилось с интервалом в 20^0 и для трех типов приложения нагрузки – взбросовым, сбросовым и сдвиговым. Таким образом, всего было рассчитано 27 геомеханических моделей (рисунок 3.2). В качестве параметров работы скважин были использованы величины накопленной добычи нефти (НДН) и средние дебиты добычи нефти вертикальными скважинами (339,325,003,307,326 и 071, рисунок 3.3). Сравнение проводилось с помощью коэффициента корреляции Пирсона. В результате выполненных исследований установлено, что статистически максимальное влияние на работу скважин оказали параметры геомеханической модели с ориентировкой оси сжатия – 150^0 , а осью растяжения – 60^0 , при сдвиговом типе поля напряжений. Установленное юго-восточное сжатие рассматривается как граничное условие при построении модели. Как известно, в резервуаре с разнонаправленными по отношению к текущему полю напряжений трещинами, проводящими (открытыми) будут те трещины, которые являются критически напряженными. В критически напряженном состоянии находятся трещины и разломы, азимут которых совпадает с азимутом Sh max или не превышает его на $\pm 30^\circ$. Такие трещины и разломы являются преимущественно открытыми и благоприятными для перетоков флюида в пределах резервуара.

Для моделирования трещиноватых залежей необходимо корректно использовать исходную геологическую информацию. В результате моделирования, создается

интегрированная залежь с трещиновато-пористой средой, где свойства трещин зависят от большого числа геологических факторов. Проблема моделирования месторождений решается простым объединением большого числа доступных данных в согласованных моделях. Исходными данными, необходимыми для построения модели трещиноватого коллектора, являются ориентировка и плотность трещин. Эти данные в косвенном виде содержатся в атрибутах геомеханических карт напряженного состояния.

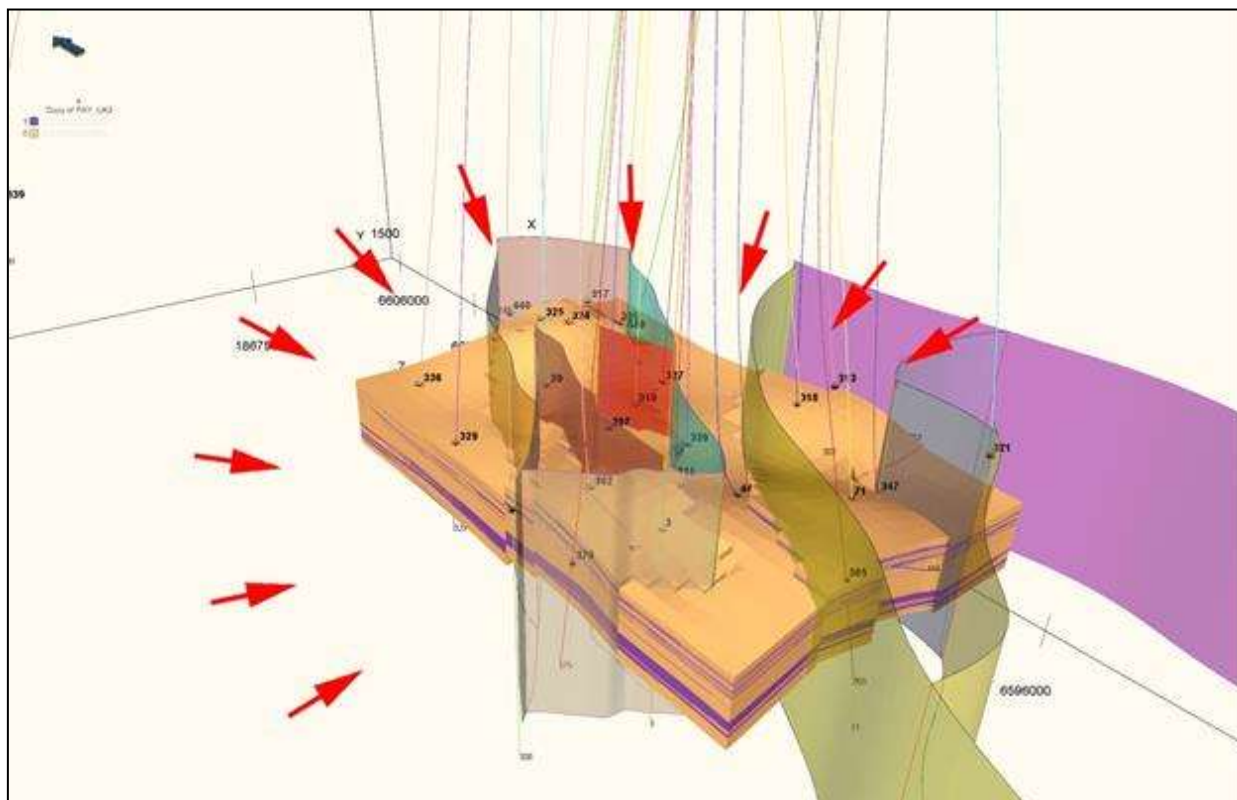


Рисунок 3.2. Общий вид 3D геодинамической модели восточной части рассматриваемого месторождения. Стрелками показаны варианты ориентировок приложенных внешних нагрузок (пояснения в тексте).

Напряженное состояние коллектора в программном модуле RMSFracture моделируется с помощью упругой конечно-элементной модели (Elastic Stress). Данный метод позволяет сравнительно точно описывать возможные контактные взаимодействия, в том числе при больших величинах деформации, с образованием складок, а также моделировать процесс образования трещин в результате деформирования при выполнении заданных критериев разрушения. При этом региональное поле напряжений

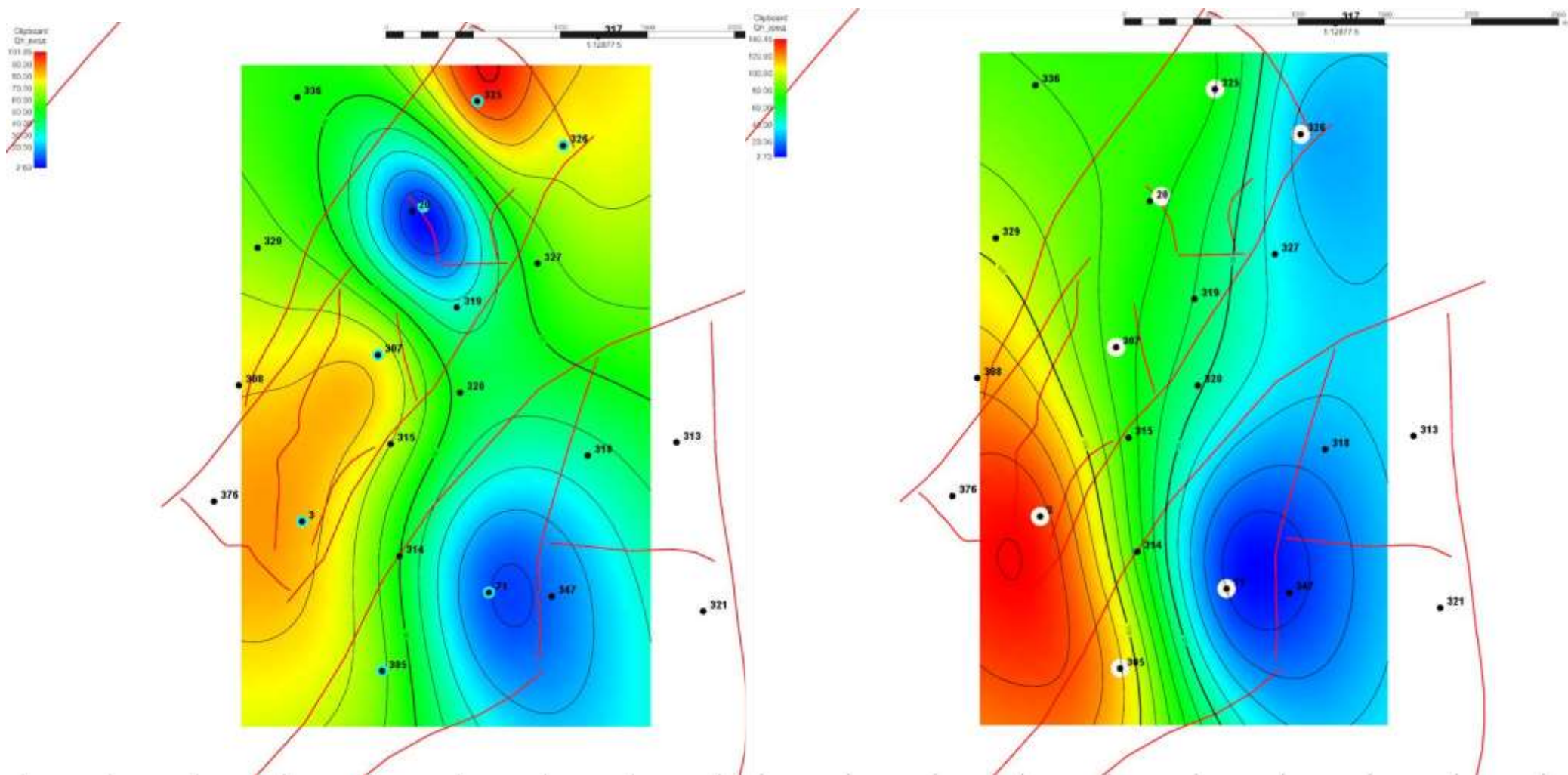


Рисунок 3.3. Схемы распределения входных – А и средних дебитов – Б вертикальных скважин (339,325,003,307,326 и 071) нефтяного месторождения.

рассматривается как граничное условие. В результате приложенной нагрузки происходит смещение по существующим разломам, что приводит к появлению локального поля напряжений. Основной целью такого (геомеханического) моделирования является выявление локального поля напряжений и оценка его влияния на появление новых или изменение степени раскрытости существующих трещин.

Помимо этого, реконструкция напряженно-деформированного состояния горного массива (пространственное распределение осей эллипсоида напряжений и зон пригрузки и разгрузки) имеет первостепенное значение для прогноза проницаемости нефтенасыщенных пластов. В данной модели были рассчитаны следующие параметры:

- горизонтальное сжатие, вызванное тектоническими процессами,
- горизонтальное растяжение, вызванное тектоническими процессами,
- вероятность появления новообразованных трещин,
- смещение вызванные горизонтальным сжатием по осям X,Y,Z.

На рисунках 3.4 и 3.5 показаны распределения относительной величины максимальных сжимающих и растягивающих напряжений в пределах исследуемой территории. Интересно отметить, что большинство максимумов на схеме Sh_{max} ориентированы в субширотном и субмеридиональном направлениях, в то время как максимумы Sh_{min} имеют ярко выраженную северо-восточную ориентировку. Оценивая напряженное состояние рассматриваемого региона в целом, следует отметить, что максимальные сжимающие напряжения приурочены к сводовым частям поднятий, в то время как максимальные растягивающие напряжения приурочены к бортам поднятий. Сопоставление данных параметров с характером работы добывающих скважин ($Q_{ср.}$) позволил выявить высокую степень отрицательной корреляции между ними ($K = -0.62$ и 0.93 соответственно).

Инструмент моделирования напряжений IrapRMS содержит ряд дополнительных операций обработки, для того, чтобы сделать выходные параметры более удобными для интерпретации. К ним относится параметр «Fracture Likelihood», которые можно перевести как «вероятность появления трещин». Расчеты появления новообразованных трещин в горных породах делаются на основании математической модели Мора — Кулона, описывающей зависимость появления касательных напряжений от величины приложенных нормальных напряжений. Fracture Likelihood имеет диапазон значений от положительных до отрицательных. При этом, положительные значения Fracture Likelihood указывают на преодоление предела прочности пород в рассматриваемой ячейки, а отрицательные значения – на стабильные условия и не вызывающие появления трещин. Проведенные

расчеты позволили сделать ряд выводов, отражающих общий характер появления новообразованных трещин (рисунок 3.6). Во-первых, площадь появления новообразованных трещин значительно уступает стабильным, слабо деформированным территориям. Во-вторых, наиболее деформированным участком является центральная часть рассматриваемой территории, вытянутая в северо-восточном направлении параллельно двум крупным разрывным нарушениям. Данный параметр также хорошо коррелируется со средними дебитами работы добывающих скважин ($Q_{ср.}$), но при этом имеет положительное значение коэффициента Пирсона ($K = 0.80$).

Рассмотрим эффект, возникающий за счет величины смещения ячеек сетки по разломам (метод Displacement Discontinuity). Это достаточно часто используемый метод, основная идея которого заключается в том, что разломы и трещины разделяются на ряд сегментов. Значения перемещения по разломам в каждом сегменте считаются априори неизвестными. Решение осуществляется с помощью дифференциальных уравнений (Landau и Lifshitz, 1959). Размер сегментов выбирается автоматически в направлении x и y и зависит от разрешения сетки. Направление z контролируется пользователем и определяется вертикальным размером разлома. Таким образом, можно рассчитать величину перемещения по трем направлениям параллельным ребрам сетки (по X , Y , Z).

Для восточной части рассматриваемого месторождения данные параметры имеют (Рисунок 3.7) особое значение. Параметр смещения по Z показывает, что на новейшем тектоническом этапе осевая часть складки поднималась, причем особенно интенсивно на юго-западе, в районе скважины 3. Отметим, что с ростом поднятия растут и средние дебиты скважин. Коэффициент корреляции составляет $K=0.89$. Сопоставление смещений по оси Y с характером производительности эксплуатационных скважин позволил выявить тренд увеличения дебитов скважин с ростом амплитуд горизонтальных перемещений (Рисунок 3.8). График зависимости между средними дебитами нефти и амплитудой горизонтальных перемещений указывает на прямую зависимость. Коэффициент корреляции между данными параметрами составляет $K=0.91$. Принципиально иная картина наблюдается для параметра смещения по X . Здесь средние дебиты растут с уменьшением величины X . Коэффициент корреляции составил $K = -0.66$.

Напомним, что для описания сложных коллекторов, обладающих значительным количеством трещин, при моделировании фильтрационных процессов в пласте применяется метод двойного пространства (двойной пористости и проницаемости), позволяющий строить гидродинамические модели высокой степени точности. В стандартном методе двойного пространства все ячейки имеют двойные свойства.

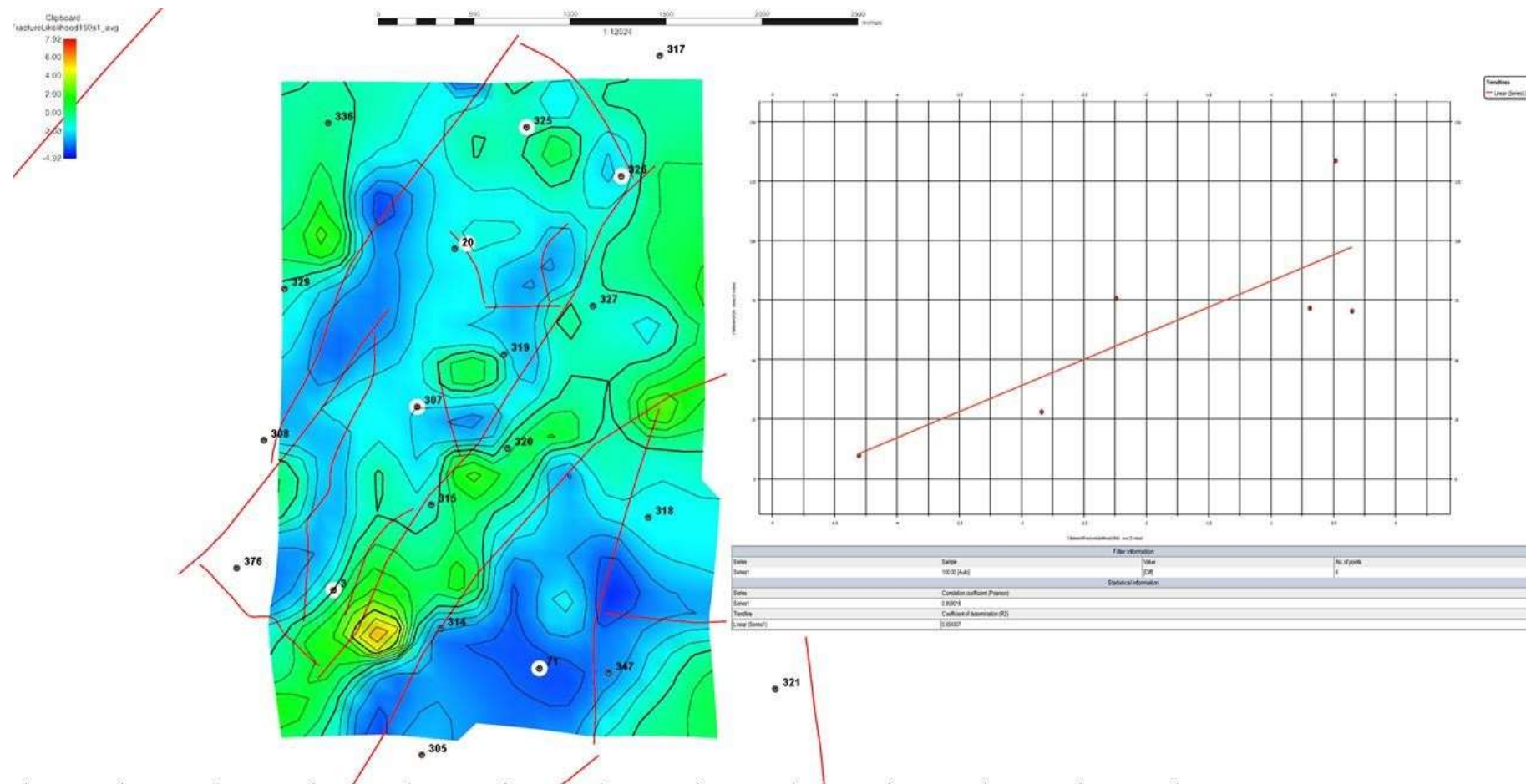


Рисунок 3.6. Элементы геомеханической модели: вероятность появления вторичной трещиноватости и график зависимости вероятности появления вторичной трещиноватости от средних дебитов горизонтальных скважин (коэффициент корреляции $K=0.80$)

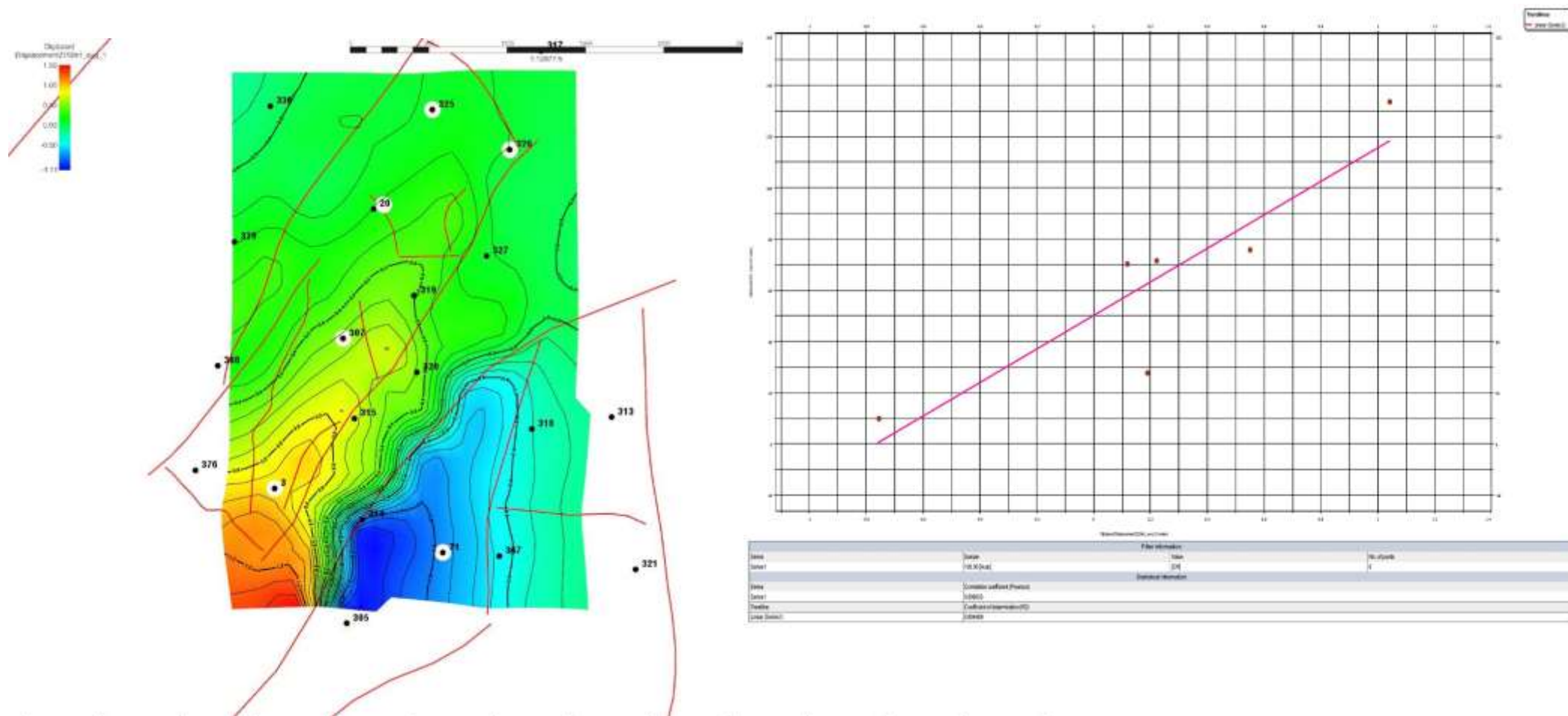


Рисунок 3.7. Элементы геомеханической модели: смещение по Z (Displacement Z) и график зависимости значения средних дебитов от величины смещение по Z (коэффициент корреляции $K=0.89$)

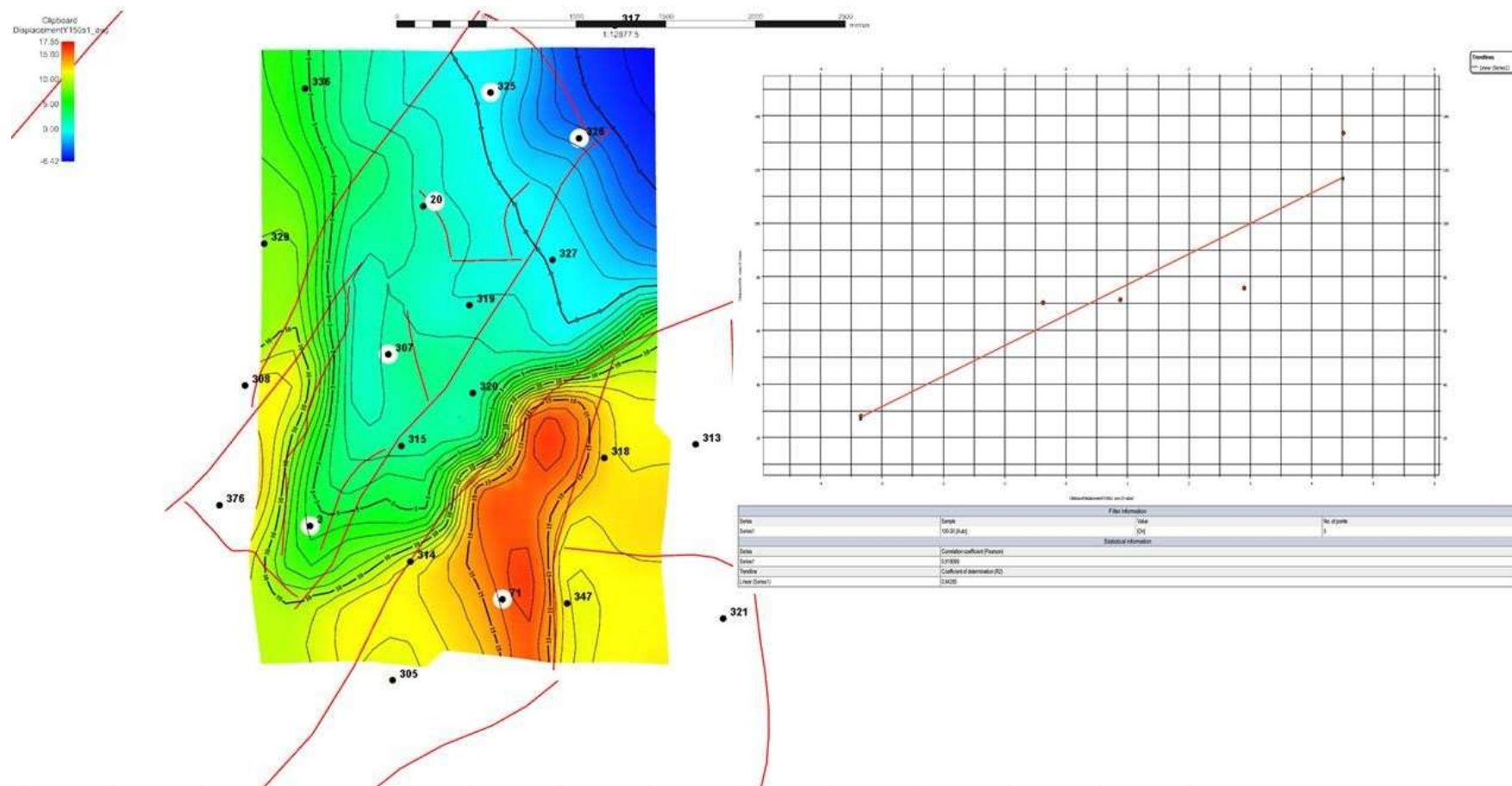


Рисунок 3.8. Элементы геомеханической модели: смещение по Y (Displacement Y) и график зависимости значения средних дебитов от величины смещение по Y (коэффициент корреляции $K=0.91$)

Первичная пористость и проницаемость, связанная с межзерновыми параметрами терригенного коллектора, изучается с помощью традиционных методов. Вторичная – с помощью специальных геофизических методов, позволяющих прогнозировать плотность, апертуру и ориентировку систем трещин. Изучаемое месторождение обладает именно таким – сложным коллектором. Это обстоятельство подтверждается множеством независимых фактов. Во-первых, значительным различием в производительности эксплуатационных скважин, зачастую расположенных недалеко друг от друга. Во-вторых, анизотропией фильтрационных параметров между скважинами. В-третьих, статистической зависимостью между дебитами скважин и структурными параметрами геологической среды. Выявленная взаимосвязь между геодинамическими параметрами и характером работы скважин позволяет предположить, что для данного месторождения вторичная (трещинная) пористость и проницаемость является весьма значимой, а значит недоучет данного параметрам может привести к серьезным ошибкам при разработке залежи. Таким образом, эффективные фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора данного месторождения представляют собой «сумму» первичной и вторичной пористости и проницаемости.

Для расчёта вторичной пористости и проницаемости необходимо создать «аналитическую дискретную модель трещиноватости горного массива». Данный этап моделирования выполняется с помощью программного обеспечения (Create Fracture Model), который позволяет использовать тренды (зависимости), полученные в результате геомеханического моделирования. Отбор этих трендов осуществляется с помощью их сопоставления с характером работы скважин (рисунок 3.10). Отбираются лишь те параметры, которые значимо влияют на их работу. Для восточной части рассматриваемого месторождения эти тренды описаны выше.

Дискретная модель трещиноватости, построенная по трем (наиболее информативным) геодинамическим трендам с учетом азимутов трещин показана на рисунке 3.11.

Оценка вторичной пористости и проницаемости была выполнена с помощью программного модуля Dual-Porosity Modelling. Вероятностная величина плотности трещин рассчитывается с помощью аналитической дискретной модели трещиноватости. Для оценки степени открытости трещин используется величина горизонтальных смещений. И, наконец, для определения интегральной величины воздействия данных параметров их нормируют по степени значимости (коэффициенту Пирсона), а затем «складывают».

Модуль Dual-Porosity Modelling позволяет рассчитывать трещинную проницаемость в разных форматах. В данной работе были рассчитаны параметры Kh maximum, Kh minimum

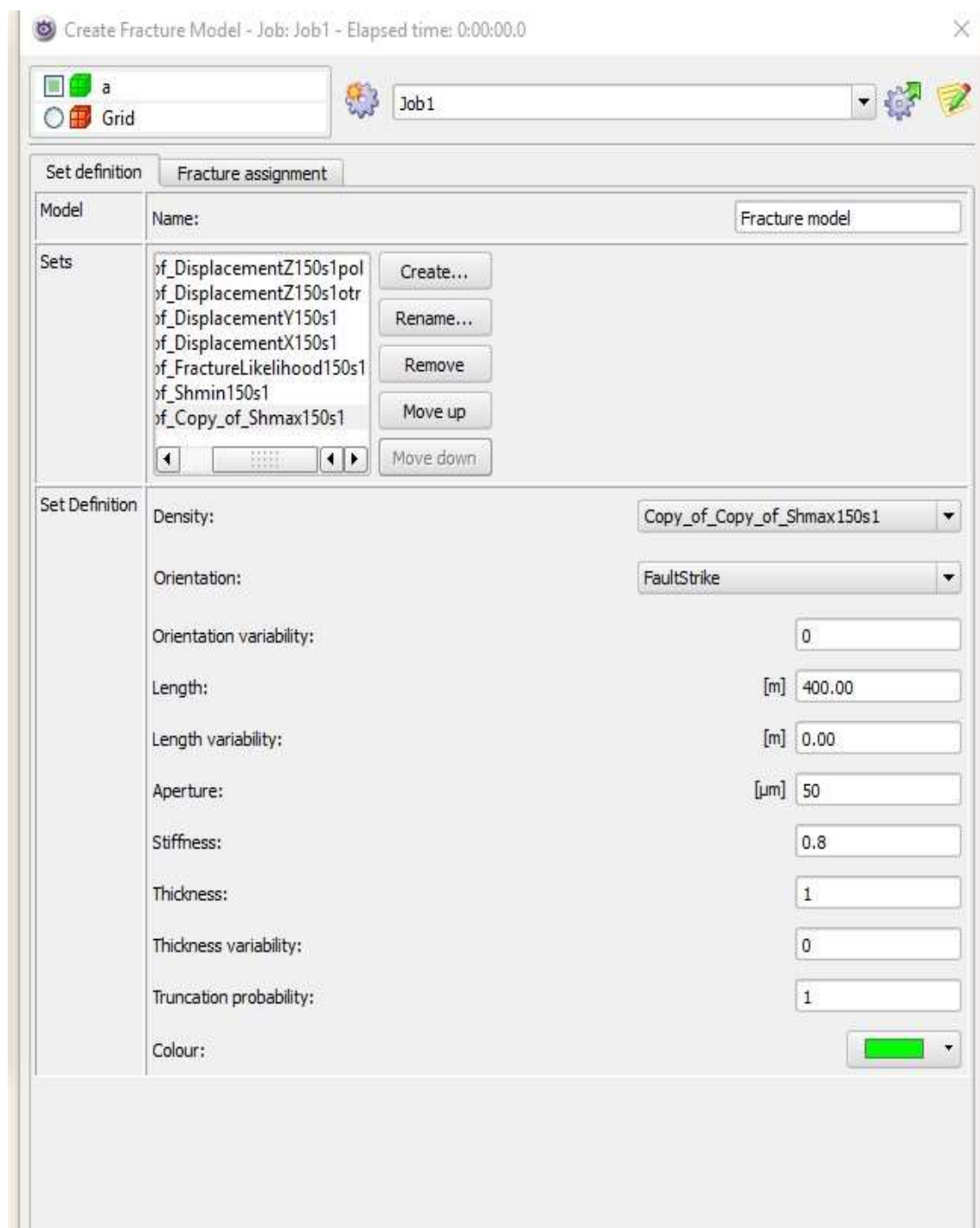


Рисунок 3.10. Параметры семи геодинамических трендов, использованных для расчета «дискретной модели трещиноватости».

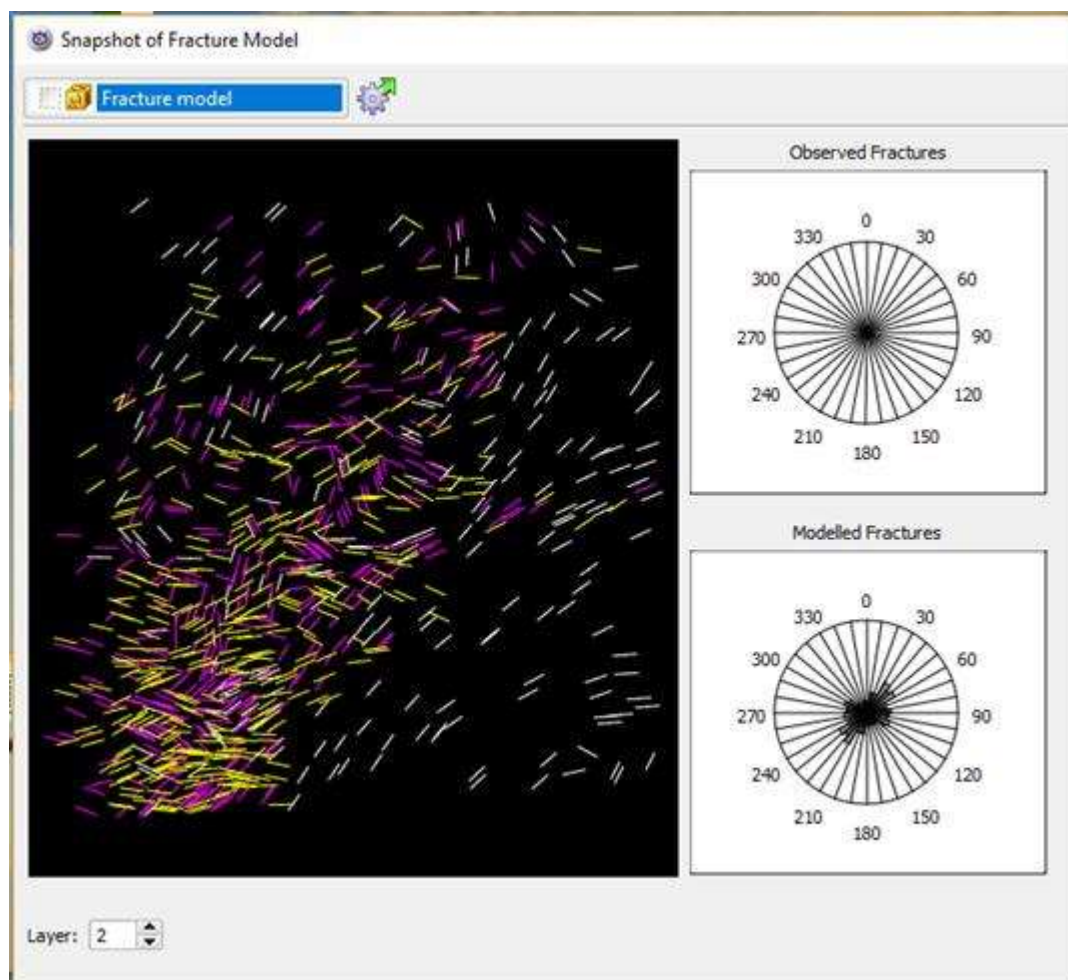


Рисунок 3.11. Дискретная модель трещиноватости, построенная по трем (наиболее информативным) геодинамическим трендам с учетом азимутов трещин. Цветом показаны системы трещин, построенные с помощью разных параметров

и Kh max direction, которые могут использоваться в симуляторе Eclipse. На рисунке 3.12 представлены расчеты Perm Kh max и график зависимости между средними дебитами нефти и трещинной проницаемостью. Виден четкий тренд увеличения максимальных дебитов скважин с возрастанием вторичной проницаемости. Коэффициент корреляции между этими параметрами составляет 0.92.

Выявление активных геодинамических зон и каналов миграции флюидов

Ключевым моментом для понимания характера миграции флюидов в пределах рассматриваемого нефтяного месторождения являются разрывные нарушения, которые, с

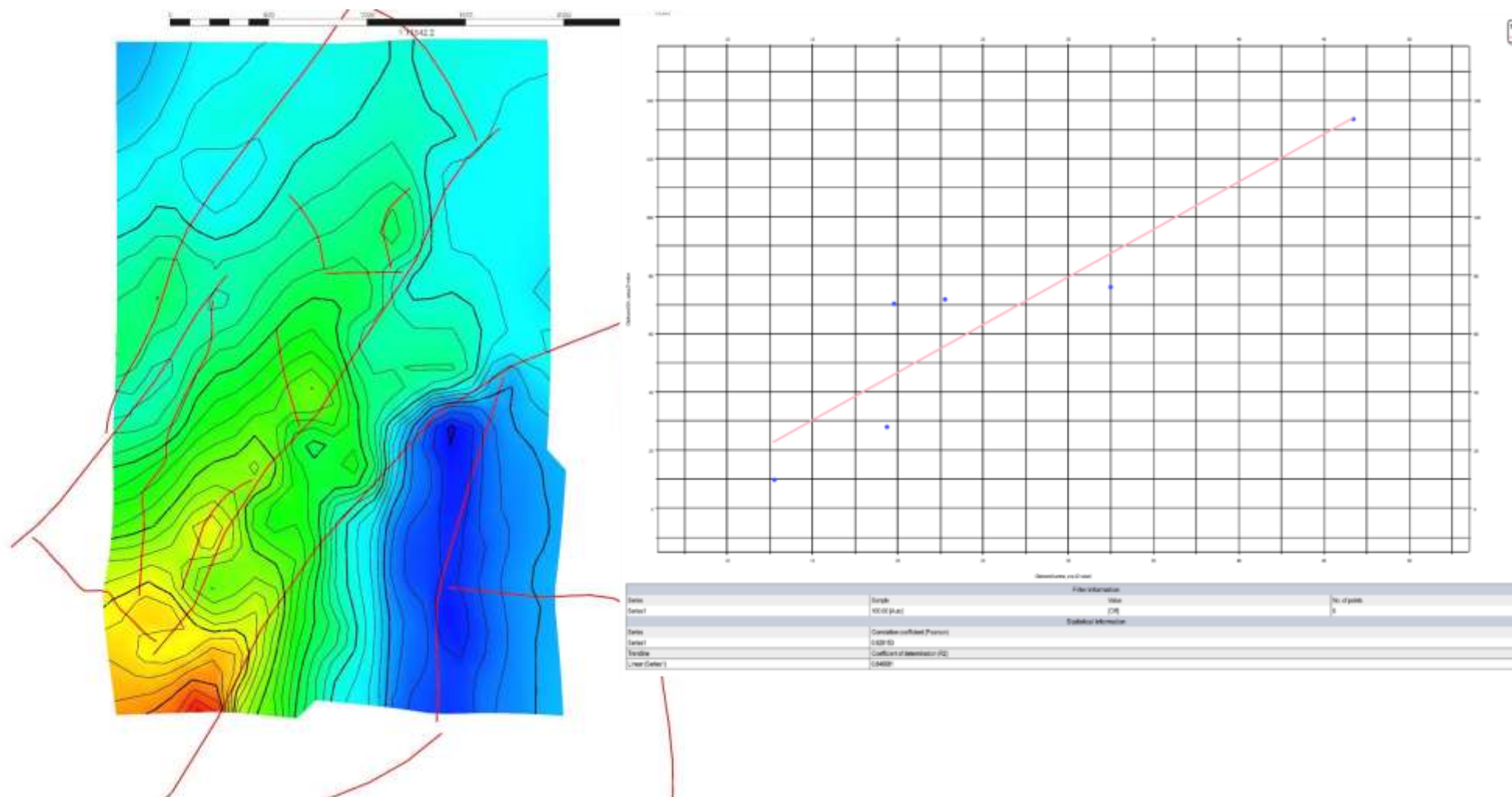


Рисунок 3.12. Схема вторичной проницаемости $Perm\ Kh\ тах$, построенная по трем параметрам и график зависимости между средними дебитами нефти и трещинной проницаемостью. Коэффициент корреляции между этими параметрами составляет 0.92.

одной стороны, являются гидрогеологическими барьерами, определяющими положение ВНК, с другой стороны, создают каналы миграции углеводородов. На разрезе, построенном через скважины 321305-302-339 хорошо видно разрывные нарушения, по которым ВНК разорван и находится на разных гипсометрических уровнях (Рисунки 3.13- 3.14). Но даже в тех случаях, когда ВНК не нарушен, смещение пластов-коллекторов разрывными нарушениями может сильно повлиять на величину проницаемости. Исследование межскважинного пространства на участке рассматриваемого нефтяного месторождения Иркутской области закачкой меченых жидкостей выполненное специализированной компанией в определенной степени прояснила ситуацию. Было выполнено исследование участков нагнетательных скважин №№ 317, 329, 327, 319, 308, 376, 347, 305, 320, в результате которого обозначились основные направления миграции флюидов и величина проницаемости жидкости по выявленным каналам. Однако не всегда трассирование фильтрационных потоков было логично объяснить. Необходимо было привлечь дополнительную геолого-геофизическую информацию. Такими данными стали результаты расчетов специальных прогностических сейсмических атрибутов, полученный из срезов куба Stochastic Enhanced CC, выделенных на основе прецизионной оценки когерентности. Эти срезы позволили в значительной степени по-новому взглянуть на тектоническую структуру.

Помимо этого, важной особенностью исследуемой территории является высокая степень унаследованности форм рельефа дневной поверхности от разрывных нарушений, выявленных благодаря атрибутам сейсмического поля. Несмотря на то, что анализируемые срезы находятся в основании палеозоя, на глубине более 2000 метров разрывные нарушения, установленные в продуктивном горизонте, отлично «читаются» в рельефе. На представленной карте цифровой модели рельефа (ЦМР) совмещенной со срезом сейсмического атрибута прекрасно видно, что практически все особенности сейсмического поля находят свое отражение в ландшафте современного рельефа (Рисунок 3.15). Особенно это касается западной части исследуемой территории, где преобладают северо-восточные ориентировки разрывных нарушений. Структурный каркас восточной оконечности месторождения построен более сложно. Помимо северо-восточных ориентировок, здесь отчетливо просматриваются субмеридиональные направления. Судя по рельефу, эти направления станут преобладающими еще восточнее, за пределами лицензионной площади месторождения. Таким образом, рельеф дневной поверхности может использоваться как репер структурного каркаса усть-кутского горизонта.

Схема сейсмических атрибутов, полученный из срезов куба Stochastic Enhanced CC содержит в себе информацию не только о разрывных нарушениях, но и о активных геодинамических зонах или трещинах. Для того, чтобы извлечь данную информацию была использована программа LESSA, благодаря которой были выделены наиболее значимые каналы миграции (LESSA - Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis - это программа автоматического поиска линейных элементов и анализа их ориентации на любых изображениях. Данная программа включена в качестве модуля в комплекс обработки дистанционных изображений ERDAS). Мы использовали возможности программы LESSA для обработки цифровых моделей рельефа. Программа, анализируя любую поверхность выделяет осевые части «поднятий» и «прогибов», а затем предлагает ряд статистических параметров, таких как: розы - диаграммы, плотности линейных элементов, протяженные линеаменты, вектора, линии вытянутости, сходство соседних роз-диаграмм и др. (<http://www.lineament.ru>). Нами с помощью программы LESSA была обработана поверхность сейсмического атрибута Stochastic Enhanced CC (рисунок 3.16). Выделены линейные элементы, интерпретируемые как каналы миграции флюидов. Помимо выделения трещин, программа рассчитывает статистические параметры, связанные с распределением выделенных объектов: плотность, розы-простираций, линии вытянутости, границы по розам и др., которые были использованы для выявления каналов миграции флюидов (рисунок 3.19).

Полученные с помощью данного инструмента данные (рисунок 3.17) позволили оценить влияние тектонической нарушенности (плотность трещин) на характер производительности эксплуатационных скважин. График зависимости значений средних дебитов эксплуатационных скважин от плотности трещин показывает отрицательную корреляцию $K=-0,64$. Это достаточно неожиданный результат, свидетельствует о том, что скважины работают более эффективно, когда пласт наименее нарушен.

В результате анализ вклада в обводнение скважин были отобраны четыре скважины для которых зарегистрированы самые высокие значения проницаемости по объекту более 100 мкм². Во всех случаях фильтрационные потоки проходили по одним и тем же зонам фильтрации.

Так, например, по результатам трассерных исследований отмечается значительное влияние на обводнение скв. 324 добывающего окружения нагнетательных скважин №№ 305, 376, 329, 317, 327, 319. На рисунке 3.18 показаны наиболее вероятные пути миграции трассеров. Отметим, что распределение фильтрационных потоков совпадает с простираанием тектонических разломов, но не следует по ним. Значения проницаемости

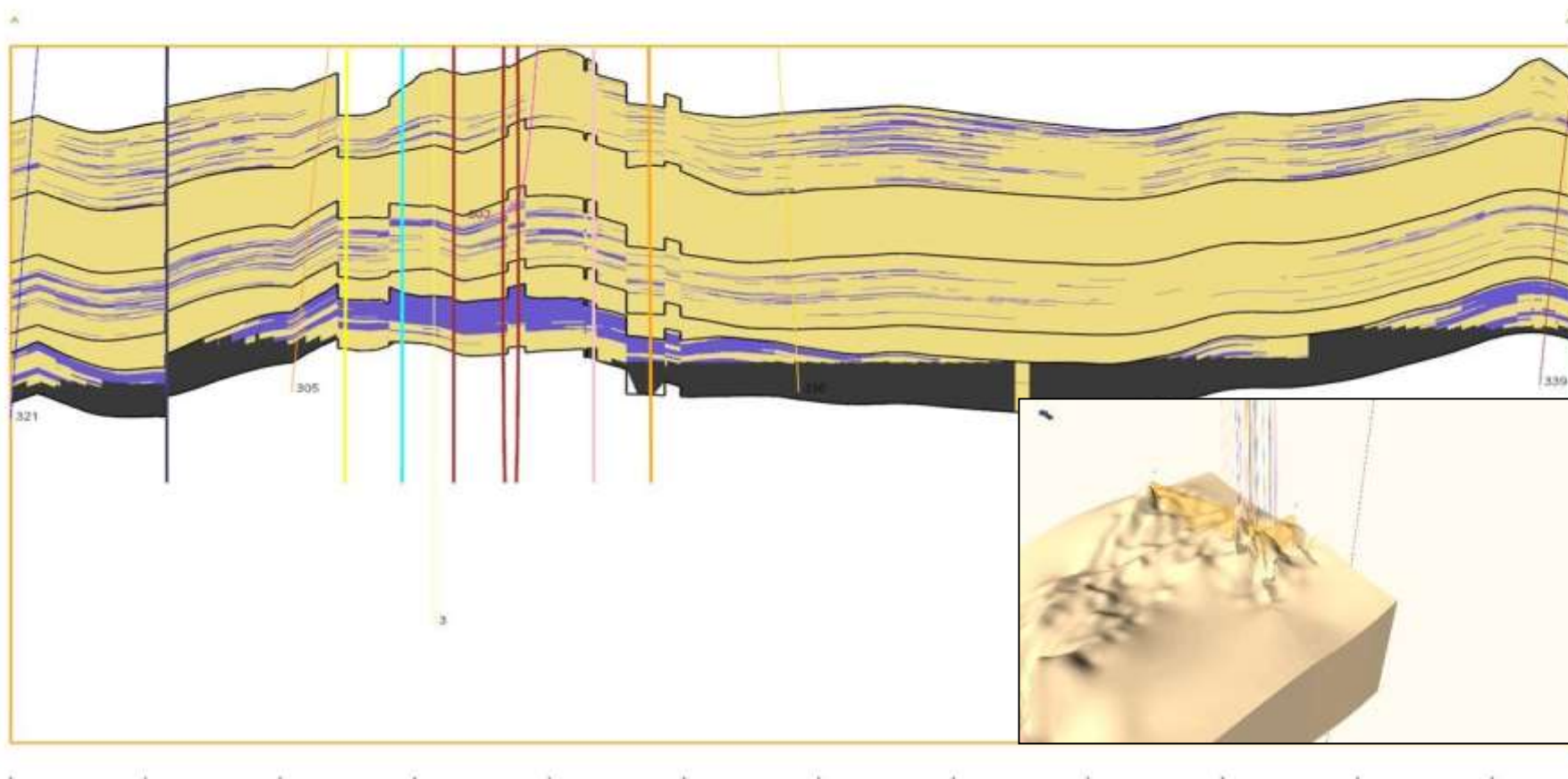


Рисунок 3.13. Геологический разрез усть-кутского горизонта (V2) между скважинами 321-339. Фиолетовым цветом показаны коллектора, черным цветом – область ниже ВНК.

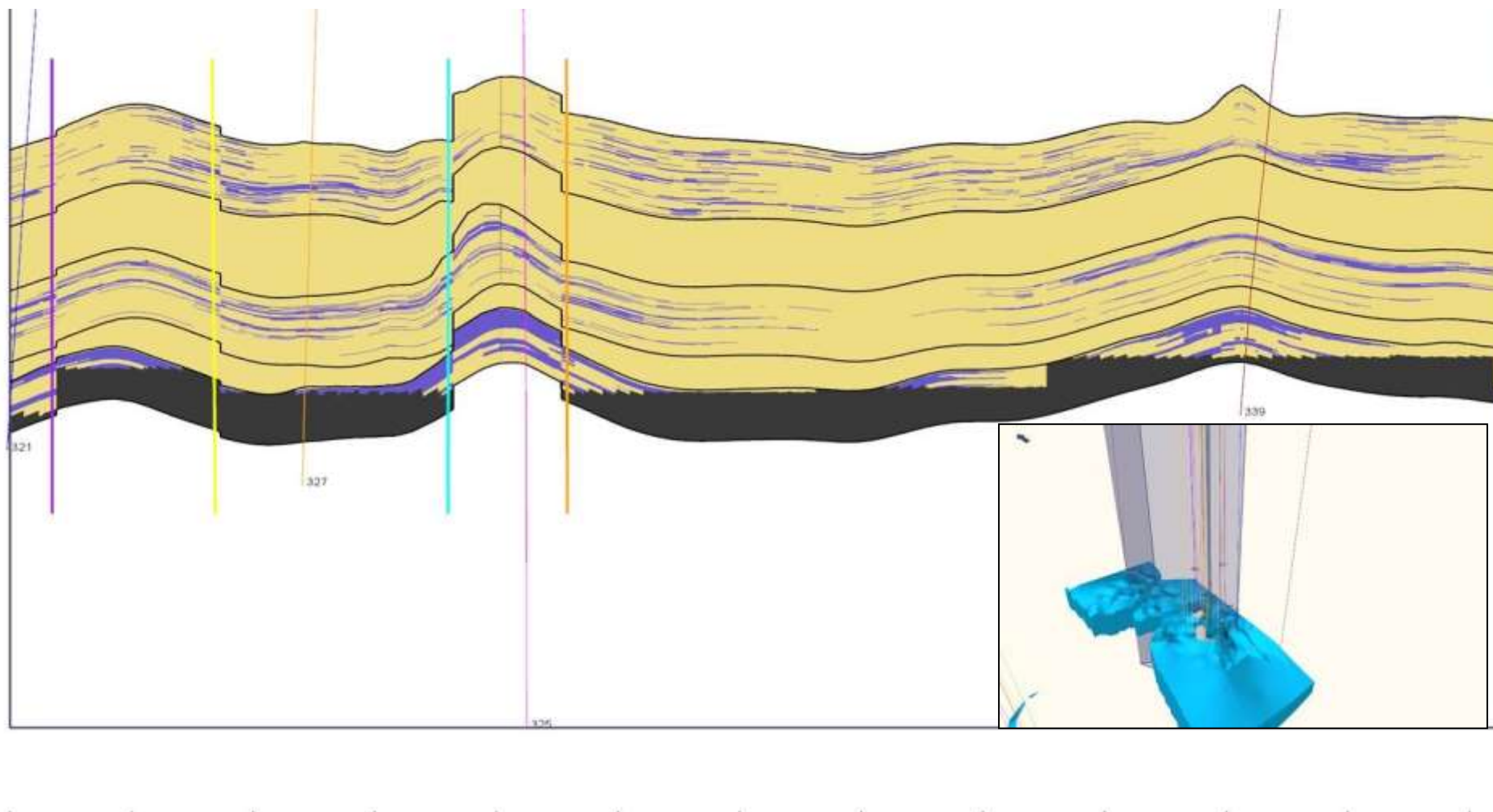


Рисунок 3.14. Геологический разрез усть-кутского горизонта (V2) между скважинами 321-327-325-339. Фиолетовым цветом показаны коллектора, черным цветом – область ниже ВНК.

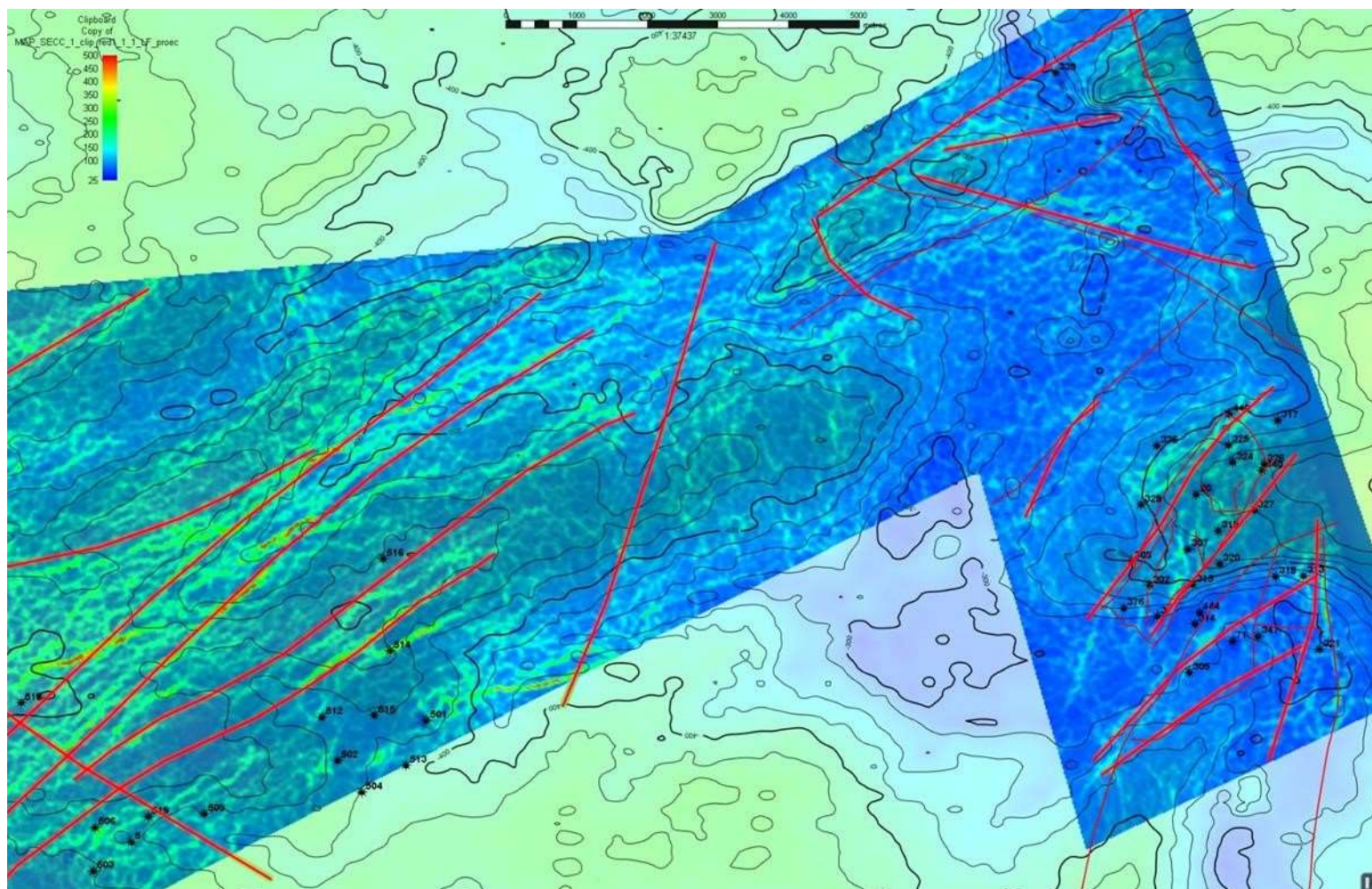


Рисунок 3.15. Сейсмический атрибут *Mar_SECC_Iclip* с выявленными крупными разрывными нарушениями и наложенная на них карта рельефа дневной поверхности

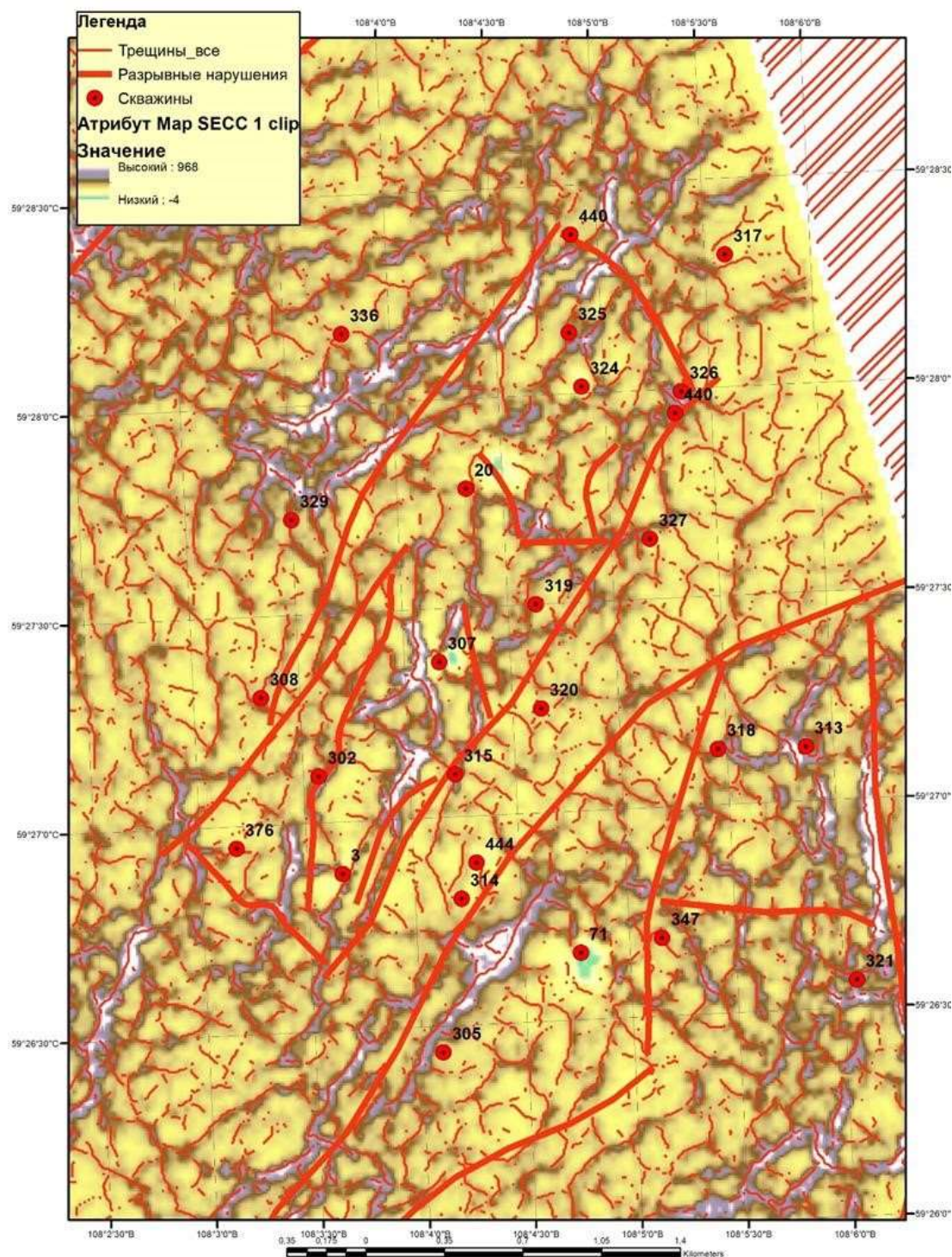


Рисунок 3.16. Сейсмический атрибут *Мар_SECC_1slip* с выделенными на нем с помощью программы LESSA крупными зонами трещиноватости (тонкие красные линии). Толстые красные линии – разрывные нарушения.

между скважинами 324-305 равно 298 мкм², 324-376 равно 205 мкм², 324-329 равно 90 мкм², 324-317 равно 10 мкм², 324-327 равно 6 мкм², 324-319 равно 22 мкм². Такое распределение значений проницаемости свидетельствует о тесной связи данных каналов с геомеханическими параметрами и вторичной проницаемостью (см. рисунок 3.17).

Обводнение скважины 20 связано с работой нагнетательных скважин 305 (проницаемость между ними – 617 мкм²), 329 (проницаемость - 79 мкм²), 308 (проницаемость - 168 мкм²), 319 (проницаемость - 97 мкм²) (Рисунок 3.20.). Очевидно, что и в этом случае максимальные значения проницаемости расположены строго вдоль максимального геомеханического воздействия.

Скважина №326 наиболее сильно обводняется скважинами 305 (проницаемость - 451 мкм²), 329 (проницаемость - 143 мкм²), 327 (проницаемость - 14 мкм²), 317 (проницаемость - 9 мкм²). Снова мы видим четкую приуроченность к вторичной проницаемости (рисунок 3.21).

По результатам трассерных исследований отмечается значительное влияние на обводнение скв. 307 нагнетательных скважин №№ 305, 376, 329, 317, 319, 308. На рисунке 22 показаны наиболее вероятные пути миграции трассеров. Значения проницаемости между скважинами 307-305 равно 155 мкм², 307-376 равно 130 мкм², 307-329 равно 59 мкм², 307-317 равно 147 мкм², 307-308 равно 41 мкм², 307-319 равно 18 мкм². И снова мы имеем максимальные значения проницаемости, приуроченные к наиболее подвижным областям рассматриваемой территории (см. рисунок 3.24.).

Сопоставление каналов фильтрации флюидов параметрами раздробленности геологической среды, полученные с помощью программы LESSA показывают их приуроченность к линиям вытянутости (см рисунок 3.23) В центральной части (район скважин 376, 3, 307, 20) вытянутые в субмеридиональном, а южнее скважины 376 в северо-западном направлении. Кроме этого, в районе скважины 20 мы видим, что каналы фильтрации разворачиваются согласно с линиями вытянутости и приобретают субширотную ориентировку.

Итак, выполнив анализ геодинамического состояния и фильтрационных свойств коллектора исследуемого нефтяного месторождения можно сделать ряд выводов:

Во-первых, удалось существенно дополнить наши представления о тектоническом строении и современном поле напряжений исследуемой территории. В результате чего была построена обновленная 3D геомеханическая модель, более адекватно отражающая работу скважин.

Во-вторых, на основе обновленной геомеханической модели рассчитаны значения вторичной проницаемости, которые подтверждаются фильтрационными параметрами, полученными в результате трассирования потоков изучаемого объекта.

В-третьих, благодаря новому сейсмическому атрибуту Map_SECC_1clip удалось наметить каналы фильтрации, и увязать их проницаемость с обновленной геомеханической моделью.

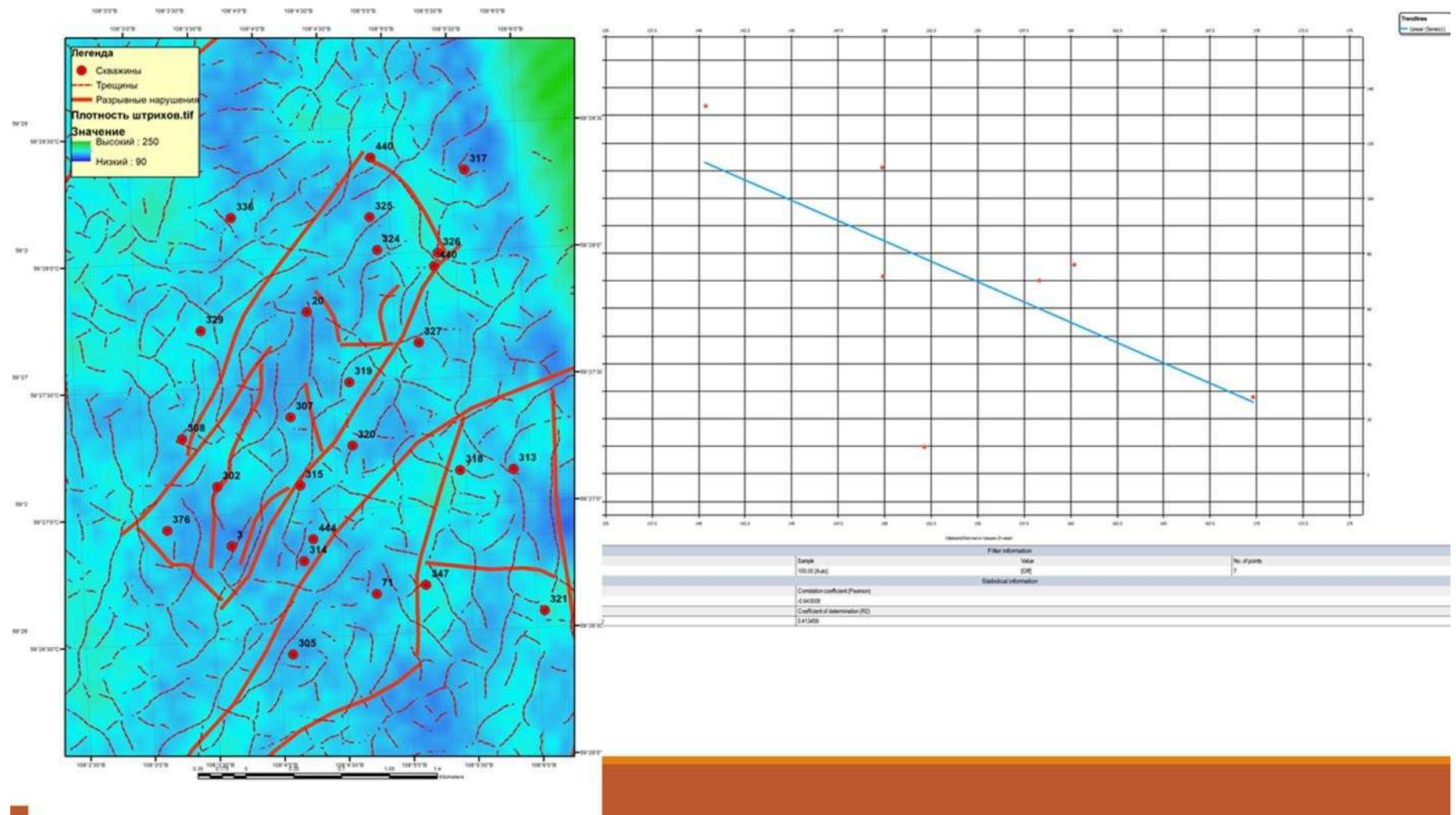


Рисунок 3.17. Плотности трещин, выделенных по сейсмическим атрибутам Map_SECC_1clip и график зависимости значения средних дебитов от плотности трещин (коэффициент корреляции $K=-0,64$).

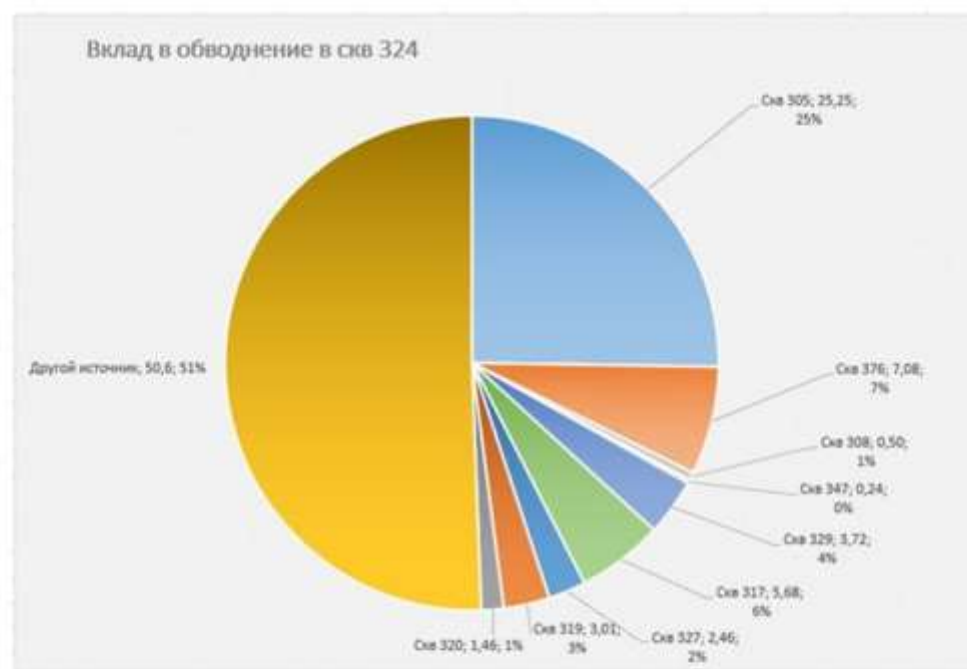
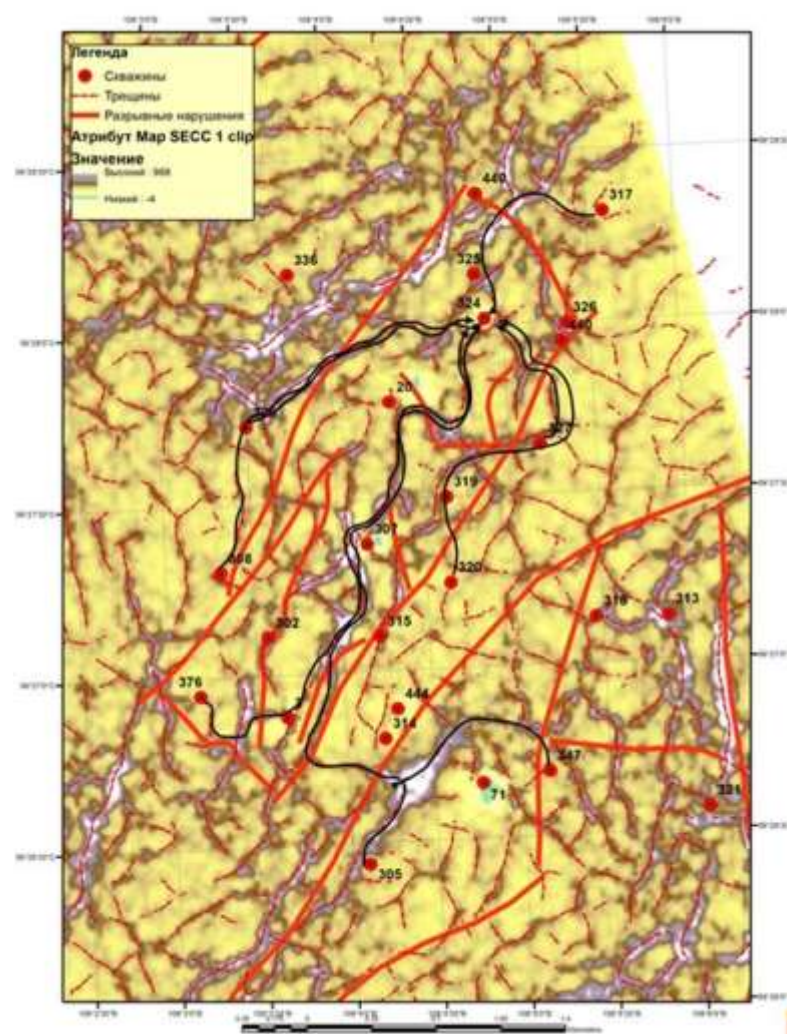


Рисунок 3.18. Каналы миграции флюидов и вклад в обводнение скважины № 324

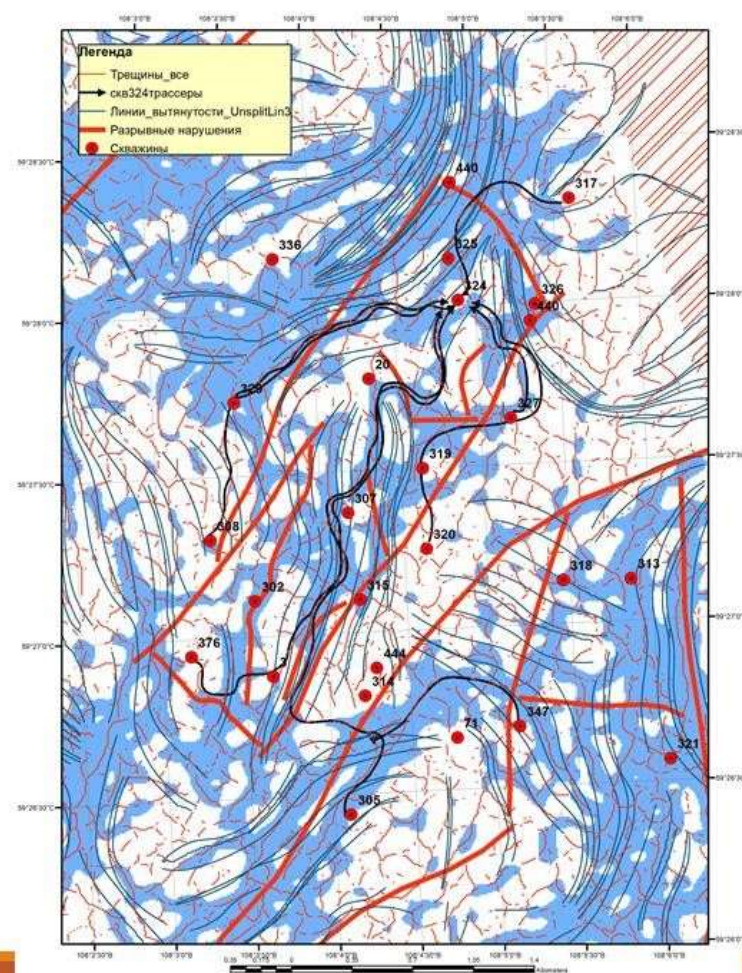
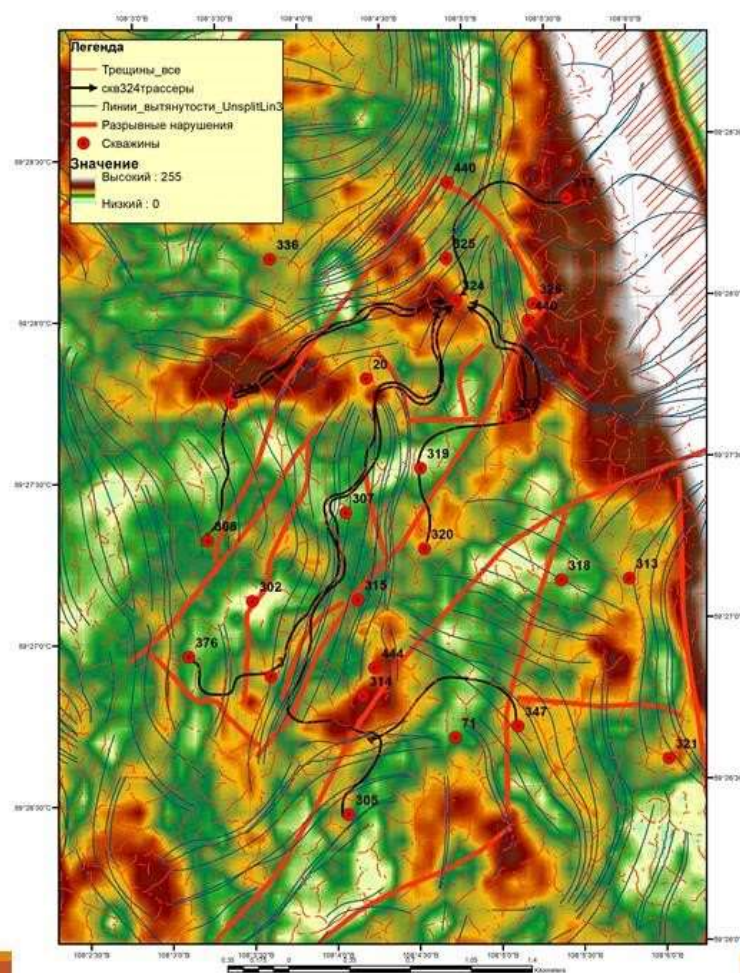


Рисунок 3.19. Методика выявления каналов миграции флюидов с помощью линий вытянутости, границы построены по розам простираний и сейсмическому атрибуту Map_SECC_1clip

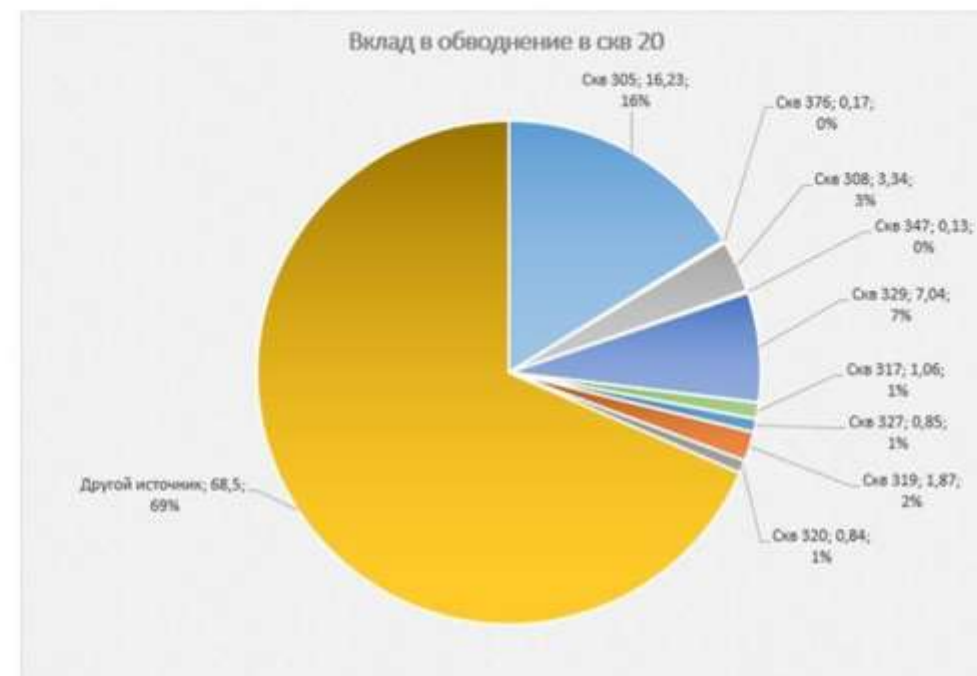
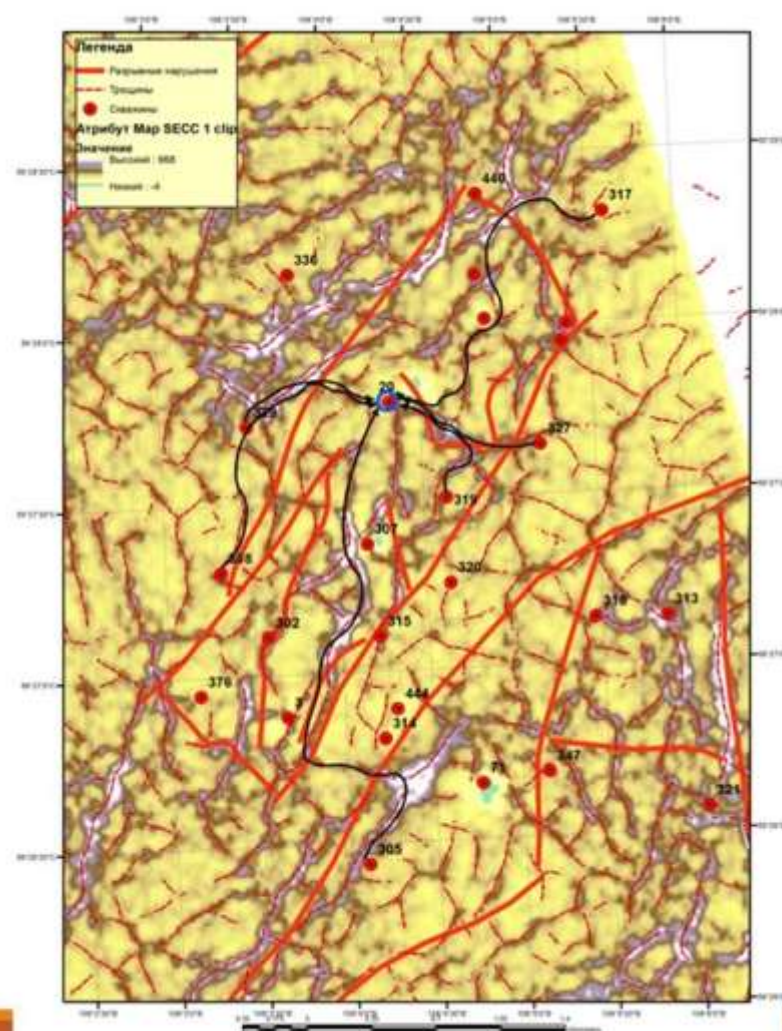


Рисунок 3.20. Каналы миграции флюидов и вклад в обводнение скважины № 20

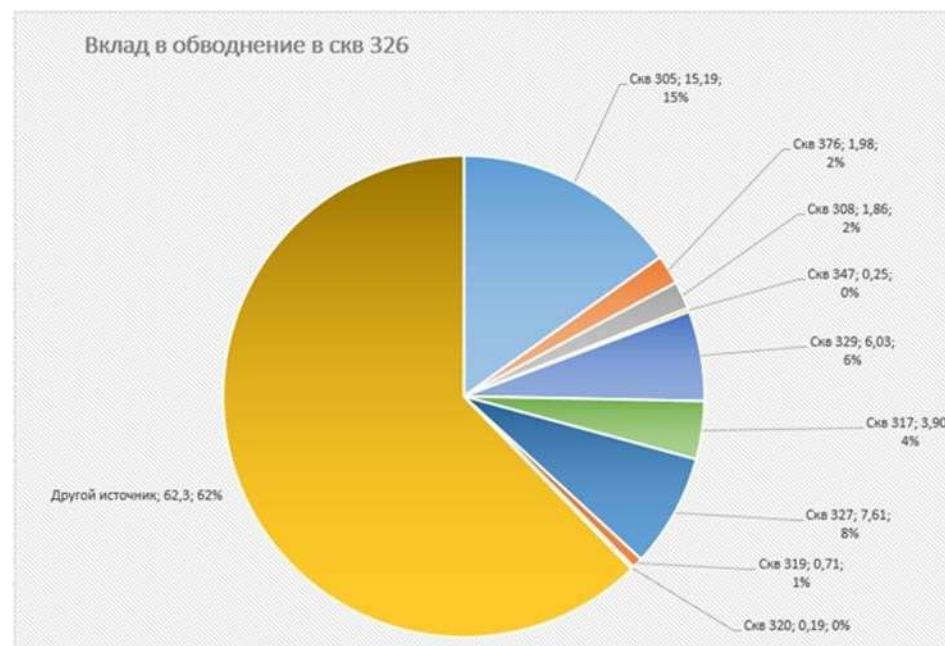
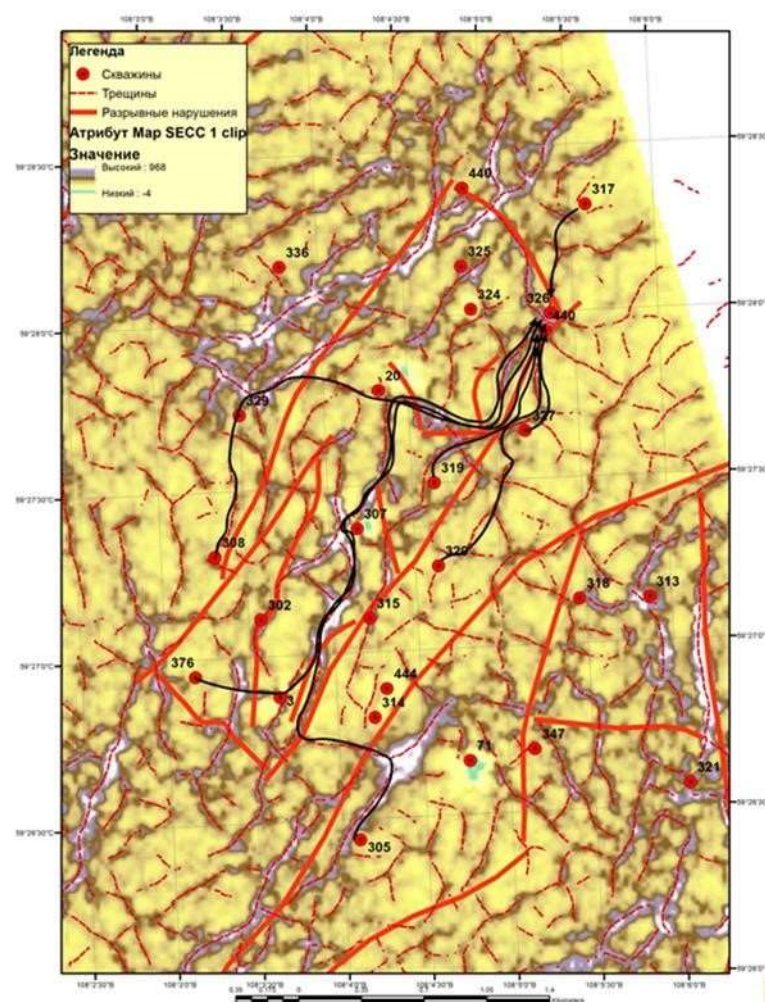


Рисунок 3.21. Каналы миграции флюидов и вклад в обводнение скважины № 326

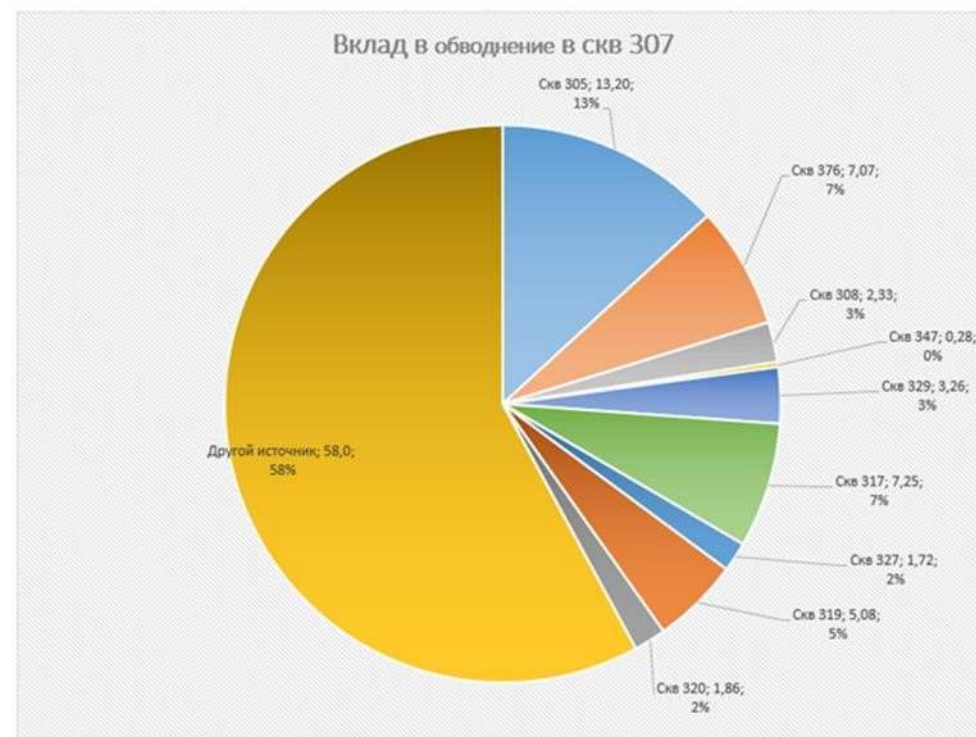
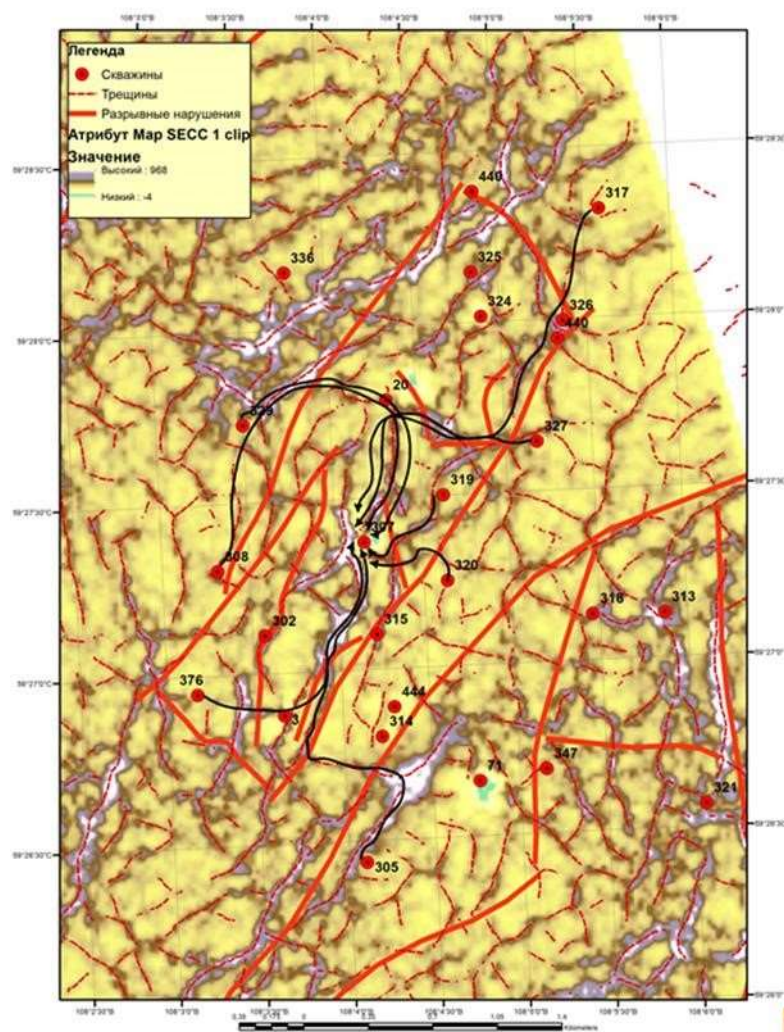


Рисунок 3.22. Каналы миграции флюидов и вклад в обводнение скважины № 307

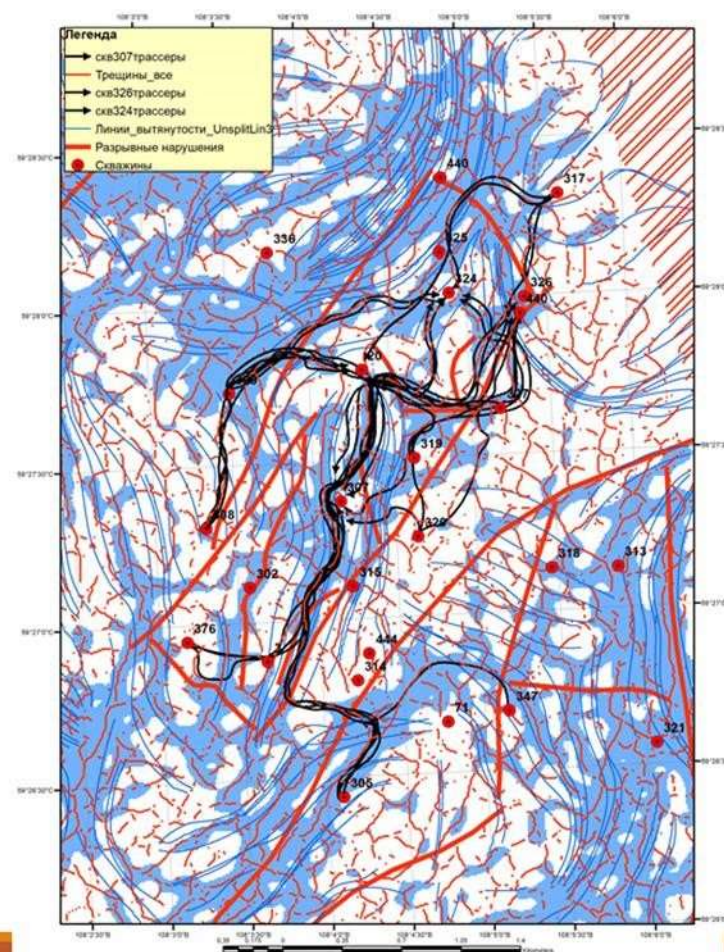
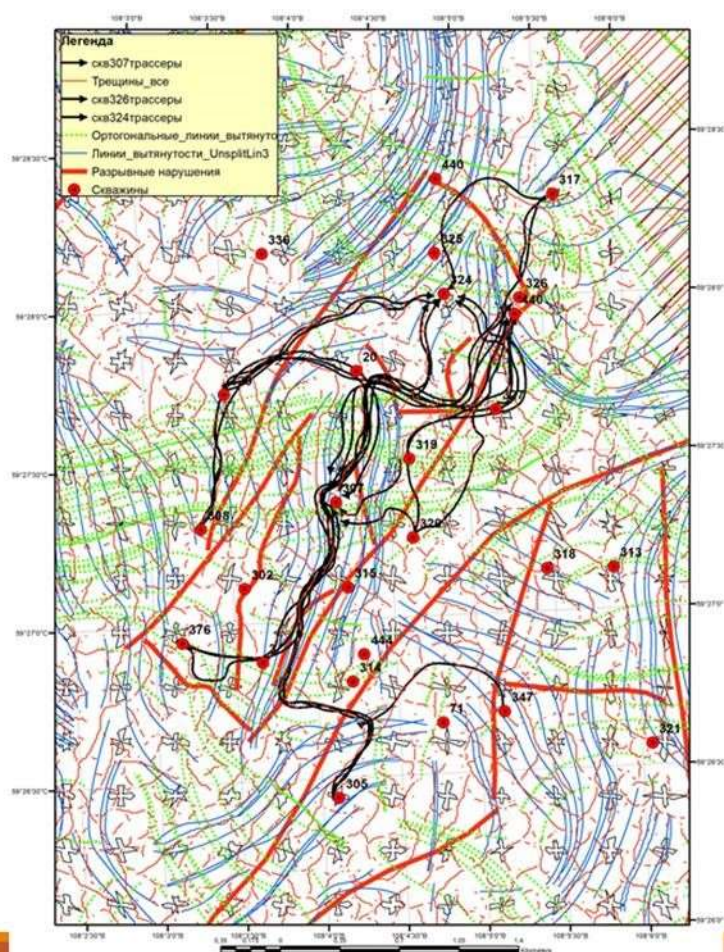
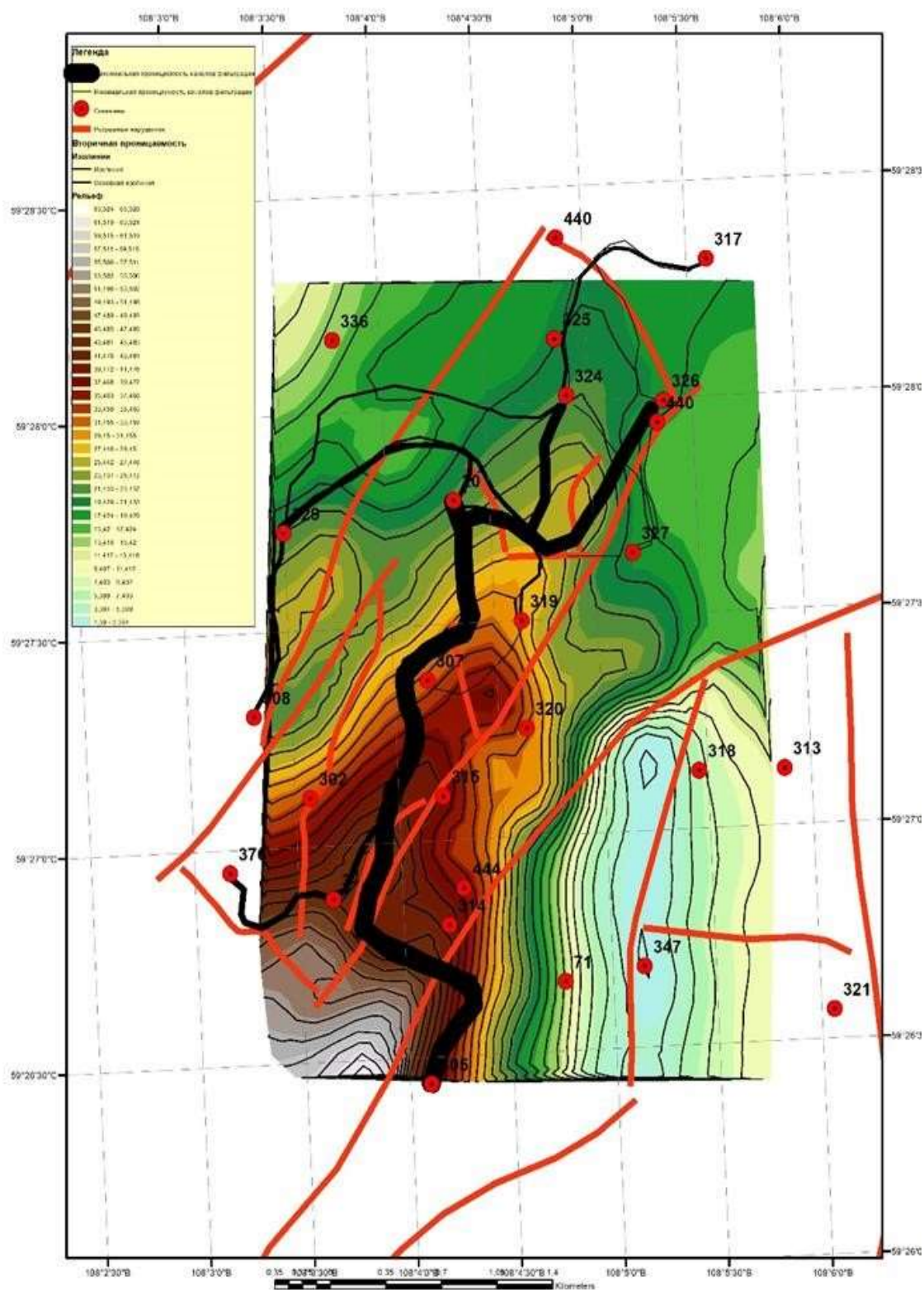


Рисунок 3.23. Каналы миграции флюидов к скважинам №324, 20, 326, 307 на схемах линий вытянутости и геодинамически активных зон трещиноватости.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Агибалов А.О., Балашов Г.Р., Сенцов А.А. Оценка $M_{\max}$ в зонах ВОЗ Сахалина и Большого Кавказа по разным эмпирическим формулам // Материалы II Всероссийской научной конференции «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов», посвященной 300-летию Российской академии наук. М.: ИФЗ РАН, 2024а. С. 45–50.

Агибалов А.О., Балашов Г.Р., Сенцов А.А. Сопоставление результатов интегральной оценки новейшей геодинамической активности Алтае–Саянской области геоморфологическими и тектонофизическими методами с характером современной коровой сейсмичности // Материалы II Всероссийской научной конференции «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов», посвященной 300-летию Российской академии наук. М.: ИФЗ РАН, 2024б. С. 51–56.

Адушкин В.В., Санина И.А., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н. Исследование неотектонической активности морфоструктур центральной части Восточно-Европейской платформы с использованием дистанционных методов // Физика Земли. № 2. М., 2014. С.21-28.

Астраханский карбонатный массив: строение и нефтегазоносность. Под редакцией Ю.А. Воложа, В.С. Парасыны. М.: Научный мир, 2008. 221 с.

Белоусов В.В., Гончаров М.А. Автоматическое выполнение условий подобия в простейших случаях тектонического моделирования // Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка, 1991. С. 16–20.

Вишневский Л.Е., Панина Л.В. Поперечные зоны позднеюрских конседиментационных разломов Центрального Кавказа // Доклады Ан СССР. 1985. Том 284. № 5. С.1183–1185

Волож Ю.А. Строение кряжа Карпинского // Геотектоника. 1999. № 1. М.: Наука. С. 28–44

Геология СССР. Том XXI. Западный Казахстан. Часть 1. Геологическое описание. Книга 2. М.: Недра, 1970. 343 с.

Горелов С.К. Морфоструктурный анализ нефтегазоносных территорий (на примере юго-востока Русской равнины). М., Наука, 1972. 216 с.

Грачев А.Ф. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Евразии // Физика Земли. 1996. № 12. С. 5–36.

Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб: Университет ИТМО, 2017. 81 с.

Егорова Т.П., Старостенко В.И. Неоднородность верхней мантии Европы по комплексу геофизических данных // Строеие и динамика литосферы Восточной Европы. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. С. 600–623

Еремеев А.Н. Схема проницаемости земной коры Европейской части СССР по данным гелиевых исследований. Масштаб: 1:2500000. Министерство геологии СССР, 1983.

Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. №. 1. С. 22–29.

Зайцев В. А. Использование геомеханической модели нефтегазового месторождения для оценки вторичной проницаемости // Тезисы научно-практической конференции "Проблемы разработки нефтяных месторождений в условиях сильных пластовых и флюидальных неоднородностей. Тюмень, 2015.

Зайцев В. А., Керимов В. Ю., Рябухина С. Г., Бондарев А. В. Современная геодинамика и ее влияние на вторичные фильтрационные свойства коллекторов северо-восточной части Сахалинского шельфа // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. № 5. М.: МГУ, 2017. С.16–23.

Зайцев В.А., Златопольский А.А., Панина Л.В. Современный рельеф Скифской плиты как отражение деформаций фундамента // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2013. № 6. М.: МГУ. С. 13–18

Зайцев В.А., Панина Л.В. Неотектоника и геодинамика Скифской плиты // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2011. № 1. С. 3–7.

Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №3. М.: ИКИ. С.38–46.

Златопольский А.А. Пакет прикладных программ выделения и анализа линейных элементов аэрокосмических изображений // Автоматизированный линеаментный анализ при структурно-геологических и металлогенических исследованиях. М.: Недра, 1988. С.14–28.

Златопольский А.А. Пакет прикладных программ выделения и анализа линейных элементов аэрокосмических изображений // Автоматизированный линеаментный анализ при структурно-геологических и металлогенических исследованиях.

Иванов И.И. Новейшая геодинамика района Смоленской атомной электростанции // Материалы всероссийской научной конференции «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов», посвященной 75-летию со дня рождения Е.А. Рогожина (1947–

2021) и 115-летию со дня рождения В.В. Белоусова (1907–1990). М.: Издательство «Перо», 2022. С. 276-282.

Камалетдинов М.А., Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. и др. Геология и перспективы нефтегазоносности Урала. М.: Наука, 1988. 240 с.

Карта неотектонического районирования территории Российской Федерации, масштаб 1:2 500 000, под ред. Н.В. Межеловского, 2020 г.

Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб 1:5000000. Главный редактор А.Ф. Грачев. Министерство природных ресурсов России. Всероссийский институт экономики минерального сырья и недропользования. 1997.

Каталог землетрясений Международного сейсмологического центра 1964 – 2008. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: http://zeus.wdcb.ru/sep/hp/seismology.ru/hypocenter_data_ru.shtml/ (дата обращения: 10.08.2009)

Керимов В. Ю., Мустаев Р. Н., Дмитриевский С. С., Зайцев В. А. Оценка вторичных фильтрационных параметров низкопроницаемых сланцевых толщ майкопской серии центрального и восточного Предкавказья по результатам геомеханического моделирования // Нефтяное хозяйство. № 9. М., 2016. С.18–21.

Копп М.Л. Новейшие деформации Скифской и юга Восточно-Европейской платформ как результат давления Аравийской плиты // Геотектоника. 2000.

Короновский Н.В., Панина Л.В. Формирование структуры Предгорного Дагестана // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1995. № 4. М.: МГУ. С. 45–57.

Костенко Н.П. Геоморфология. М.: МГУ, 1999. 383 с.

Костенко Н.П., Панина Л.В. Позднеорогенная структура Предкавказья // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2001. № 1. М.: МГУ. С.11–20

Лаврович О. Н., Лаврович Н. Н., Гаврюшова С. А. Карта четвертичных образования. Центрально-Европейская серия. Лист N-36, М-(36) - Смоленск. М. 1:1 000 000. // Государственная геологическая карта Российской Федерации. 3-е поколение. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011.

Лилиенберг Д.А., Кафтан В.И., Кузнецов Ю.Г., Серебрякова Л.И. Картографические модели вариаций современных тектонических движений морфоструктур Кавказа и Закавказья для разных эпох // Геоморфология. 1997. № 4. М.: РАН. С. 63–75.

Макаров В.И. Региональные особенности новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности // Недра Поволжья и Прикаспия. Вып. 13 (специальный), 1996. С. 53-60.

Макарова Н.В., Макаров В.И., Корчуганова Н.И. и др. Окско-Донской прогиб – неотектоническая активная зона Восточно-Европейской платформы // Изв. вузов. Геология и разведка. 2002. № 2. С. 3-13.

Максимов А. В. Лукьянова Н. В., Горбацевич Н.Р. Карта четвертичных образований. Центрально-Европейская серия. Лист N-37 (Москва). М. 1:1 000 000. // Государственная геологическая карта Российской Федерации. 3-е поколение. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015.

Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Масштаб 1:2500000 / Ред. В.Е. Хаин, Н.А. Богданов. М.: Институт Литосферы окраинных и внутренних морей, 2003.

Наумов А.Д. Пенеплены. Их геологическое значение как особой генетической категории рельефа материков. Саратов: Саратовский университет, 1981. 404 с.

Нгуманов И.И., Нгуманова Е.В., Чернова И.Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казанский университет, 2016. 53 с.

Несмеянов Д.В., Захарова Л.Я., Тарсис А.Д., Шумова Т.Ф. Сопоставление результатов структурно-геоморфологических исследований и сейсморазведки для территории Терско-Кумского междуречья // Структурно-геоморфологические исследования при изучении нефтегазоносных бассейнов. М., 1967. С. 164–169.

Никитин М.Ю. Неотектоника Горного Дагестана // Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. 1987. М.: Наука. С. 221–238

Новейшая тектоника и геодинамика. М.: Наука, 2006. 206 с.

Панина Л.В. Новейший структурный рисунок Скифской плиты // Вестн. Моск.ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 1. С. 23-31.

Панина Л.В. Формирование структуры центральной части Терско-Каспийского передового прогиба (Терско-Сунженская нефтегазоносная область) // Тектоника и формации Большого Кавказа. 1988. М.: Наука. С.58–78

Панина Л.В., Зайцев В.А. Неотектоника Восточно-Европейской платформы и сопредельных территорий. М.: Перо, 2024. 128 с.

Панина Л.В., Зайцев В.А. Новейшая тектоника восточной части Воронежской антеклизы // Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 256-260

Панина Л.В., Зайцев В.А. Новейшая тектоника Прикаспия // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. № 1. М.: МГУ, 2014. С. 17-23

Панина Л.В., Зайцев В.А. Рельеф северного Прикаспия как отражение деформаций фундамента // Теоретические проблемы современной геоморфологии. Теория и практика

изучения геоморфологических систем: материалы XXXI пленума геоморфологической комиссии РАН (5-9 октября 2011 г). Астрахань: Техноград, 2011. С.41-45

Панина Л.В., Зайцев, В.А., Сенцов А.А., Агибалов А.О. Неотектоника центральной части Восточно-Европейской платформы//Бюлл. МОИП. Отдел геологический. Т. 91, № 4-5. М.: МГУ, 2016. С. 51-60

Панина Л.В., Костенко Н.П. Новейшие деформации на востоке Скифской плиты// Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2005. № 3. М.: МГУ. С. 5–12

Попков В.И. Складчато-надвиговые дислокации (Закаспий, Предкавказье, Азово-Черноморский регион, Скифско-Туранская плита и др.). М.: Научный мир, 2001

Равнины Европейской части СССР. Изд-во: М.: Наука, 1974. 255 с.

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии РБ–019–18 «Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях». URL: <https://docs.cntd.ru/document/556827973> (дата обращения 17.08.2024).

Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)», 2012. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2 (дата обращения: 10.03.2022).

Семенович В.В., Ровнин Л.И., Неволин Н.В., Зайченко В.Ю., Каркус Е.В., Габриэлянц Г.А., Савинский К.А. Структурная карта поверхности фундамента платформенных территорий СССР. Масштаб: 1:5000000 // Министерство геологии СССР, 1982.

Сенцов А.А. Сейсмоструктура опасных областей Восточно-Европейской платформы: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2022.

Суханова Т.В., Стафеев А.Н., Макарова Н.В. Роль Семилуки-Липецкого разлома в новейшей структуре восточного склона Воронежского поднятия. // Вестник Московского университета, №6, 2022. С. 13-22.

Федоров В.М., Залиханов А.М., Дяттерев К.С. Гравитационные факторы и астрономическая хронология вулканической и сейсмической активности Земли. М.: КДУ, Университетская книга, 2022. 308 с.

Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 232 с.

Хисамов Р.С., Файзуллин И.Н., Шарадудинов В.Ф. и др. Геологическое строение Абдрахмановской площади по данным дистанционных космических методов и полевой эманацционной съемки // Нефтяное хозяйство. № 7. М., 2004. С. 40-43

Шебалин Н.В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974.

Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии // Физика Земли. 1996. № 12. М.: Наука. С. 37–58.

Cloetingh S. A. P. L., Kooi H. Tectonics of sedimentary basins. Practical course. Amsterdam: Vrije Universiteit, Department of Sedimentary Geology, 1990. 25 p.

Cloetingh S. A. P. L., Kooi H. Tectonics of sedimentary basins. Practical course. Amsterdam: Vrije Universiteit, Department of Sedimentary Geology, 1990. 25 p. № 2. М.: Наука. С. 26–41

Pollack H.N., Hurter S.J., and Johnson J.R. The New Global Heat Flow Compilation. Department of Geological Sciences. Michigan: University of Michigan, U.S.A., March, 1991.

Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503.

Zimmerman H.J. Fuzzy set theory and its applications. Boston / Dordrecht / London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 435 p.



Коллектив авторов:

Владимир Александрович Зайцев, Людмила Викторовна Панина,
Алексей Олегович Агибалов, Илья Игоревич Иванов

**Новейшие геодинамические процессы, влияющие на
сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных
толщ**

Издательство «Перо»

109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 27, ком. 105

Тел.: (495) 973-72-28, 665-34-36

Подписано к использованию 24.02.2025.

Объем Мбайт. Электрон. текстовые данные. Заказ 177.

