

Решение модифицированной обратной задачи геопотенциальных полей на основе данных дистанционного зондирования на примере реконструкции структурно-тектонического каркаса Пучеж-Катунской зоны дислокаций

А.В. Дурандин <https://orcid.org/0000-0001-6468-9757> (ORCID)

E-mail: durandin.andrew@gmail.com

А.О. Печников <https://orcid.org/0000-0001-9626-8615> (ORCID)

E-mail: pechnikov@mobigroup.ru

Доступность современных материалов ДДЗ позволяет провести повторный анализ геологического строения Пучеж-Катунской зоны дислокаций с использованием оригинальной технологии реконструкции структурно-тектонического каркаса территорий по изменениям объемного градиента плотности геологической среды, полученного решением модифицированной обратной задачи для геопотенциальных полей. Зона дислокаций возникла в результате длительного проявления циклических тектонических процессов, связанных с формированием зоны сочленения Среднерусского авлакогена и Волго-Уральской антеклизой. Зона дислокаций и Воротиловский выступ являются максимальным проявлением типичного для Восточно-Европейской платформы внутриплитного тектоногенеза. Ковернинская впадина не является кольцевой структурой, изометричную форму ей придали перекрывающие отложения средней юры — мела, формировавшиеся на фоне затухающих движений блоков вплоть до конца мезозоя.

Ключевые слова: Пучеж-Катунская зона дислокаций, Ковернинская впадина, Воротиловский выступ, Воротиловская сверхглубокая скважина.

Пучеж-Катунские дислокации пород осадочного чехла расположены почти в центре Восточно-Европейской платформы в Среднем Поволжье. Они были отмечены еще в XIX в. Р.И. Мурчисоном. Обзор исследований и основных взглядов на происхождение Пучеж-Катунской структуры приводится во многих работах (Глубинное строение, 2010; Глубокое бурение... 1999). По мере накопления геологических материалов эти дислокации рассматривались и в качестве древних оползней, и гляциодислокаций, и проявлений диапиризма, и как результат инъекционной или гравитационной тектоники.

Центром Пучеж-Катунской зоны дислокаций является Ковернинская впадина возрастом 175–167 млн лет. После того, как буровыми работами в пределах этой

структуры в 1965 году был выявлен Воротиловский выступ архейского фундамента куполообразной формы, их происхождение стали связывать с тектоническими процессами, в частности с вертикальными перемещениями кристаллического цоколя и явлениями оползания осадков чехла на склонах поднятия (Маракушев, 1993). Одновременно появились гипотезы о взрывном (Маракушев, 1993; Нечитайло, 1959; Туманов, 1973) и вулканотектоническом происхождении данной структуры (Варданыц, 1961; Лукьянов, 1965; Масайтис, 1980) и как о многофазной эксплозивной структуре, развивавшейся от поздней перми до средней юры (Песков, 1992). Серьезными доводами в пользу этих представлений *Варданыц* являются приуроченность структуры к протяженной зоне тектонических нарушений и длительный период ее развития (Валеев, 1968; Валеев, 1978; Геология СССР, 1967; Горецкий, 1962; Нечитайло и др., 1959) (рис.1).

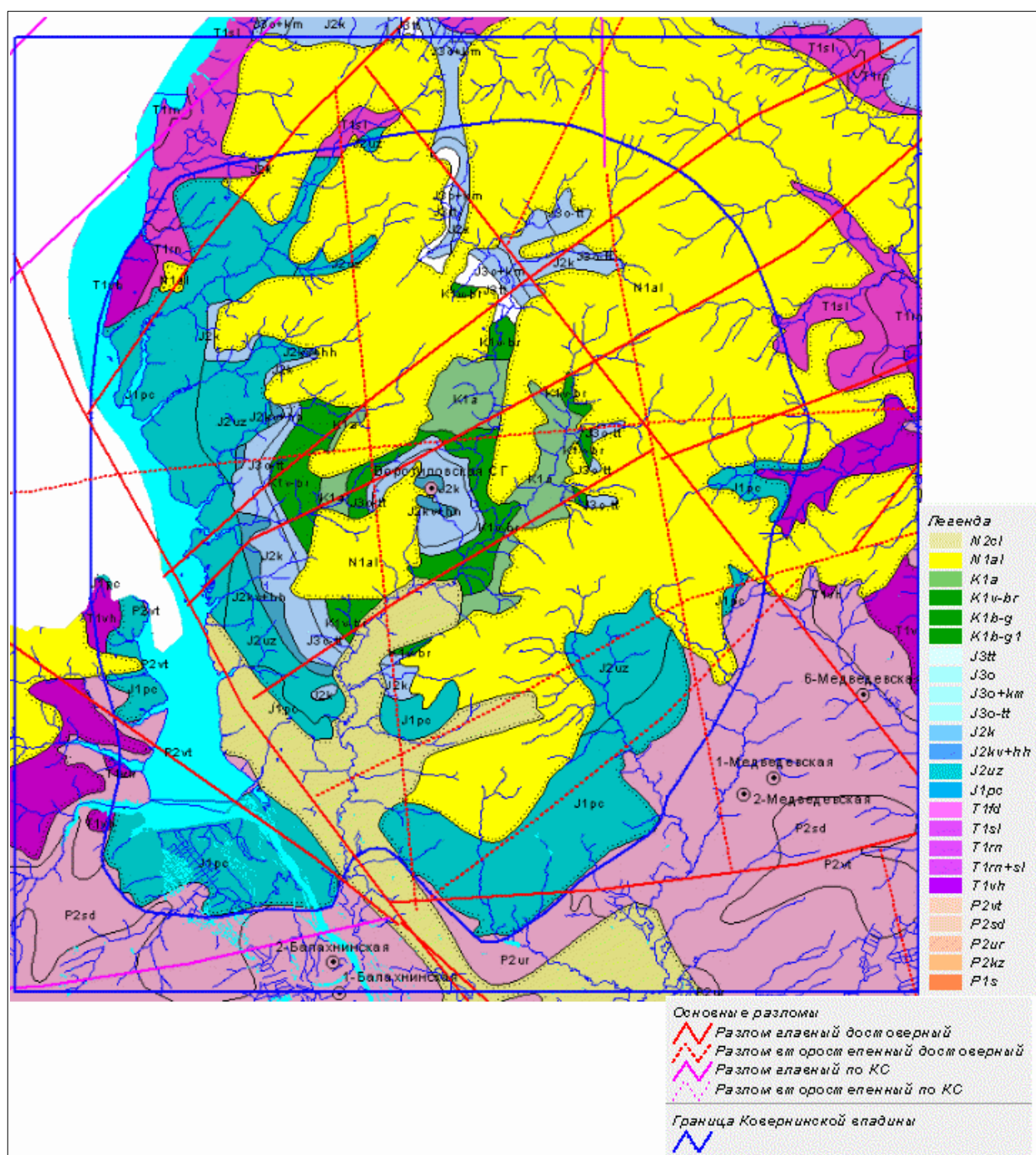


Рис.1 Фрагмент геологической карты Пучеж-Катунской зоны дислокаций (из ГИС-Атласа «Недра России», ПФО, Нижегородская область, ВСЕГЕИ, 2017, <http://atlaspacket.vsegei.ru/#3fc4a7d629b3751f11>)

В 90-х годах прошлого века по результатам геологической съемки масштаба 1:50000 автором было установлено динамометаморфическое происхождение так называемой «фангломератовой толщи» (Дурандин, 2000) (Пучеж-Воротиловский динамометаморфический комплекс) и наличие на Воротиловском выступе субвулканического Эмохонского комплекса (Дурандин, 2000). Субвулканический комплекс является результатом эксплозии газовой-паровой углеродсодержащего флюида с повышенным содержанием щелочей, сформировавшегося на глубине более 10 км в результате динамометаморфических преобразований вмещающих пород (смятие,

линеаризация и дегидратация) в субгоризонтальной базисной тектонической зоне. В эпизоне подобные зоны вырождаются в серии листрических надвигов с единой глубинной поверхностью срыва. Снижение динамической нагрузки в базисной зоне при сохранении импульсного режима подвижек в эпизоне и превышения давления флюида над литостатическим давлением привело в ааленское время к неоднократным газовой-паровым взрывам и образованию на дневной поверхности Воротиловского палеовулкана с крупным основным кальдерообразным жерлом и рядом вторичных более мелких кальдер-жерловин типа Эмохонской.

Пучеж-Воротиловский динамометаморфический и субвулканический Эмохонский комплексы имеют единый источник возникновения, но разные РТ-условия формирования и проявления. Пучеж-Воротиловский комплекс представлен четырьмя фациями, каждая из которых характеризует определенные РТ-условия формирования и проявления динамометаморфизма: гидротермально-метасоматический, метасоматический, диафорический (филлонит-будинитовый) и дислокационно-бластический подкомплекс, образующий в поверхностных условиях отложения Эмохонского комплекса (Дурандин, 2000) (рис.2).

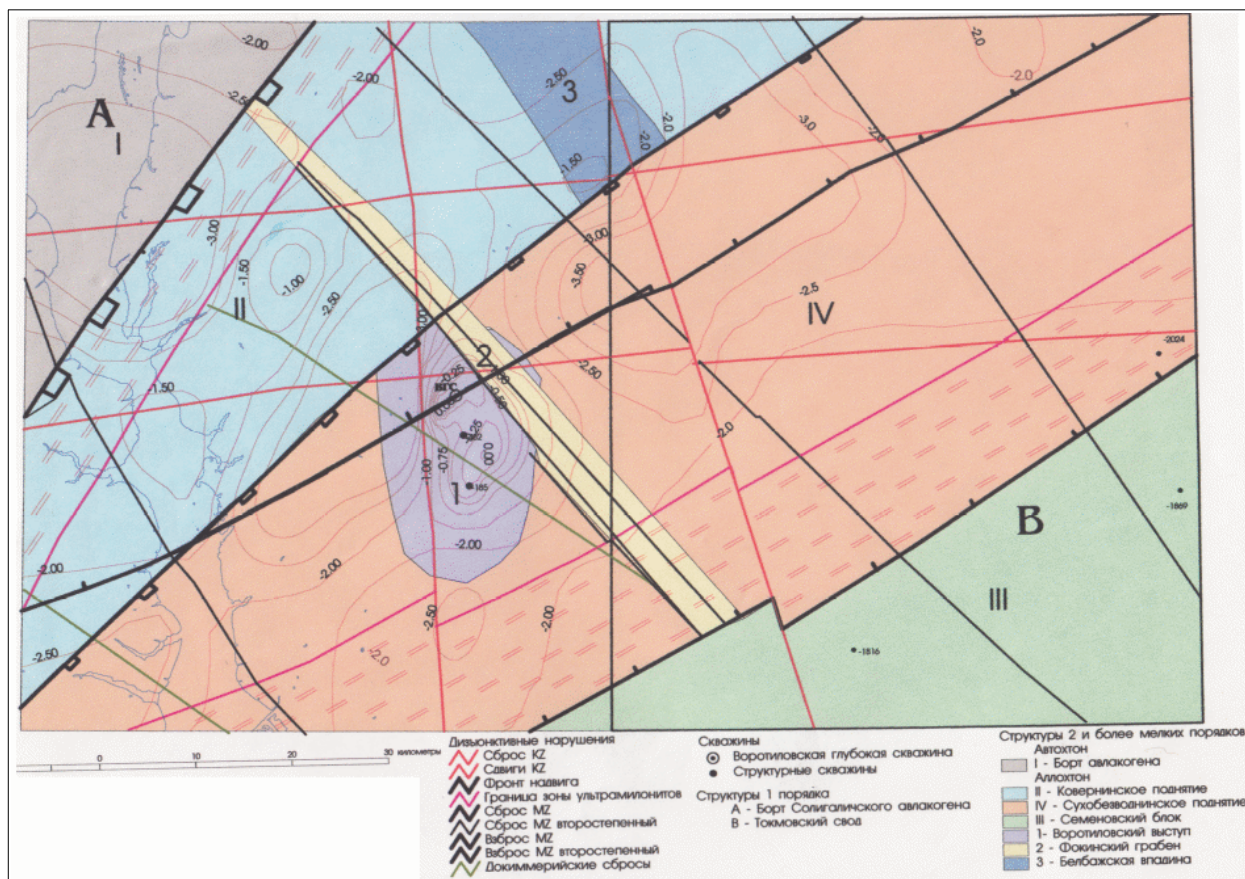


Рис.2 Структурно-тектоническая схема Воротиловского выступа (по материалам Дурандин А.В., 2000г.)

Через район Пучеж-Катунских дислокаций проходит региональный геофизический профиль (геотраверс) (Глубинное строение, 2010) с комплексом

сейсморазведочных, гравиразведочных, электроразведочных и геохимических работ (рис.3), проведено большое количество разномасштабных геологических и поисковых работ, пробурена Воротиловская сверхглубокая скважина (Глубокое бурение... 1999; Песков, 1992).

Анализ гравитационных и магнитных аномалий подтверждает линейный северо-восточный тренд этих полей, значительную их корреляцию с рельефом фундамента (рис.3) и восстановленным по результатам геолого-съёмочных работ масштаба 1:50 000 структурно-тектоническим каркасом территории (Дурандин, 2000).

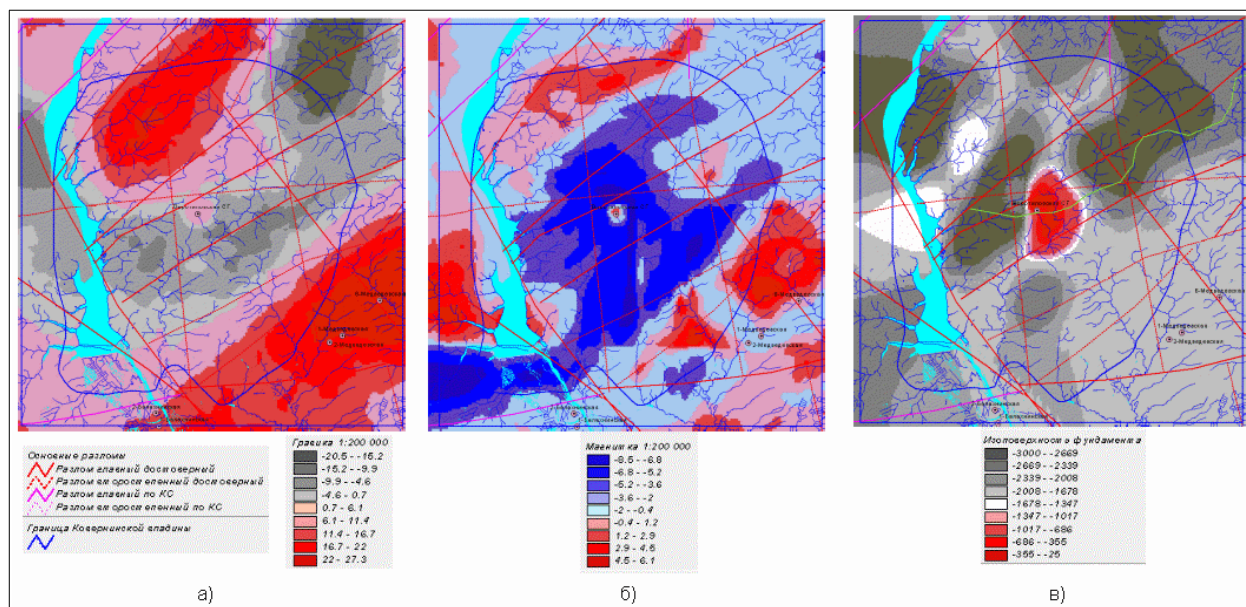


Рис.3 Аномалии гравитационного (а), магнитного (б) полей и рельеф фундамента и геотраверс (зеленая линия) (в)

Материалы исследований Воротиловской сверхглубокой скважины (5374м) (Глубокое бурение...,1999; Певзнер, 1999) позволяют оценить степень стрессового (ударного) воздействия эксплозии на гнейсы фундамента и динамометаморфические преобразования пород. Термальные преобразования гнейсов прослеживаются до глубины 4050м, стрессовое воздействие — до 3270 м. Степень термальных преобразований напрямую связана со стрессовым динамическим воздействием на породы (брекчирование — катаклаз — милониты — кристаллосланцы). В интервалах максимального динамического и термального преобразования наблюдается появление стекол со следами шок-метаморфизма и небольшие тела лав "in situ" (тагамиты) (Певзнер, 1999).

Исходные данные и методика исследования

В настоящее время доступны разнообразные спутниковые данные высокой точности: гравиметрия и альтиметрия, цифровые модели рельефа и мультиспектральные космические снимки, но, в основном, эти данные сначала используются для построения глобальных моделей рельефа или гравитационного поля Земли (Lebedev, 2013), на основе

которых в дальнейшем проводятся региональные геологические исследования. Возникает ситуация, когда для проведения детальных исследований используется государственная гравиметрическая карта масштаба 1:200 000 и государственная магнитометрическая карта масштаба 1:50 000 (Сусанина, 2010). хотя доступные спутниковые данные гравиметрии и альтиметрии позволяют получить более точные и актуальные данные. Аналогично для решения геологических задач используются глобальные цифровые модели рельефа (Канушин, 2001; Орлов, 2012) вместо исходных космических и радарных снимков более высокого разрешения.

Таким образом, представляют большой интерес методы непосредственного получения геологических результатов с помощью данных дистанционного зондирования, в том числе, по спутниковой гравиметрии и альтиметрии, цифровой модели рельефа на основе радарной съемки, мультиспектральным космическим снимкам «Landast-8», «Sentinel-2» и другим. Глубинный геологический анализ территорий может проводиться как исключительно по данным мультиспектральной космической съемки (Дурандин А.В., 2011), так и на основе совместного использования спутниковых моделей рельефа и космоснимков (Ишанкулов, 2010). Актуальна задача детализации геологического строения, изученного по государственным гравиметрическим и магнитометрическим картам, с помощью спутниковой модели рельефа и мультиспектральным космическим снимкам высокого разрешения.

Предлагаемая авторами методика основывается на решении модифицированной обратной задачи геопотенциальных полей, используя данные мультиспектральной космической съемки территорий, спутниковой гравиметрии и альтиметрии для анализа гравитационного поля. Под модифицированной задачей понимается нахождение градиента плотности среды вместо нахождения непосредственно плотности. Преимущество рассмотрения такой модифицированной задачи заключается в том, что, в силу принципа суперпозиции потенциальных полей, можно разделить локальную (высокочастотную) и региональную (низкочастотную) пространственные компоненты поля (такая операция для гравитационного поля известна в геофизике как редукция, а в численных методах анализа изображений - как выделение текстуры изображения). При этом решение классической обратной задачи для локальной (высокочастотной компоненты) будет, очевидно, отличаться от решения для полного поля, в то время как решение модифицированной обратной задачи будет сходиться к решению для полного поля, когда решение по региональной (низкочастотной) компоненте стремится к нулю. Для численного анализа такое условие эквивалентно малости разницы полученных значений градиента между

двумя смежными ячейками вычислительной сетки. Изменяя размер ячейки сетки вычислений и, соответственно, детальность решения, необходимо изменять и граничную частоту используемой высокочастотной компоненты. Точность решения модифицированной задачи по высокочастотной компоненте поля определяется как его отличие от решения по полному полю и контролируется стандартным методом оценки сходимости при уплотнении пространственной сетки.

Выбранная постановка обратной задачи не требует каких-либо геофизических допущений и априори известной информации для ее решения. При этом все изменения геологического строения и, соответственно, плотности отображаются в полученном решении. Для определения непосредственно значения плотности геологической среды необходимы априорные данные. Таким образом, горизонты залегания, разломы, структурные ловушки и другие структуры и аномалии могут быть выделены без какой-либо дополнительной информации, в то время как идентификация геологических пород требует привлечения геологической информации такой, как структурные карты, карты изотерм, колонки существующих скважин и проч. Заметим, что аномалии плотности и температуры зачастую коррелированы, поскольку, как правило, более плотная среда обладает большей теплопроводностью.

Само решение вычисляется как продолжение в нижнее полупространство (Pilkington et al., 2007) значений кольцевого преобразования Радона (КПР) (Quinto, 1994), что принципиально эквивалентно вычислительной схеме Саксова-Нигарда для геопотенциальных полей, предложенной несколькими десятилетиями ранее (Сахов, Nygaard, 1953). При этом высокочастотная фильтрация уже включена непосредственно в схему Саксова-Нигарда как радиальный градиент значений КПР с заданным шагом, иными словами, операция продолжения в нижнее полупространство. В силу развития вычислительных средств, в настоящее время нет смысла экономить вычислительные ресурсы на операциях пространственной фильтрации и вычислении градиента, поэтому авторами используется предварительная пространственная фильтрация, далее вычисление КПР и радиального градиента значений КПР с единичным радиальным шагом. Поскольку, в силу ошибок измерений исходных данных, высокие пространственные частоты содержат много шума, на практике нужно использовать полосовой фильтр, при этом частота отсечки высоких частот определяется разрешением и качеством исходных данных (Smith, Sandwell, 1994). Некоторые практические результаты, полученные вариацией метода Саксова-Нигарда, уже опубликованы в ранних работах (Дурандин, 2011).

В настоящей работе вычисления по данным гравиметрии и магнитометрии выполнены на регулярной сетке с разрешением 200м, построенной из изданных грави- и магнитометрических карт с помощью интерполяции методом обратных взвешенных расстояний (IDW). Также проведены вычисления по ИК каналам космических снимков «Landsat 8» и «Sentinel-2» с их исходным разрешением. Для анализа выбраны сцены «Landsat-8» номер LC08_L1TP_175020_20180522_20180605_01_T1 и сцена «Sentinel-2» (с выполненной атмосферной коррекцией) номер S2B_MSIL2A_20180623T082559_N0206_R021_T38VMJ_20180623T104617.SAFE без облаков на рассматриваемой территории. Как источник данных о рельефе использованы сцены ASTGTM2_N56E043, ASTGTM2_N56E044, ASTGTM2_N57E043, ASTGTM2_N57E044 продукта «ASTER Global DEM Version 2» (GDEM V2).

Результаты исследований

Для итогового анализа и визуализации результатов использовалась программа ParaView 5.4.1-822 (приложение с открытым исходным кодом - <https://www.paraview.org>). Глубина исследования по ближнему инфракрасному каналу (NIR) снимка «Landsat 8» составляла 6 км (рис.4).

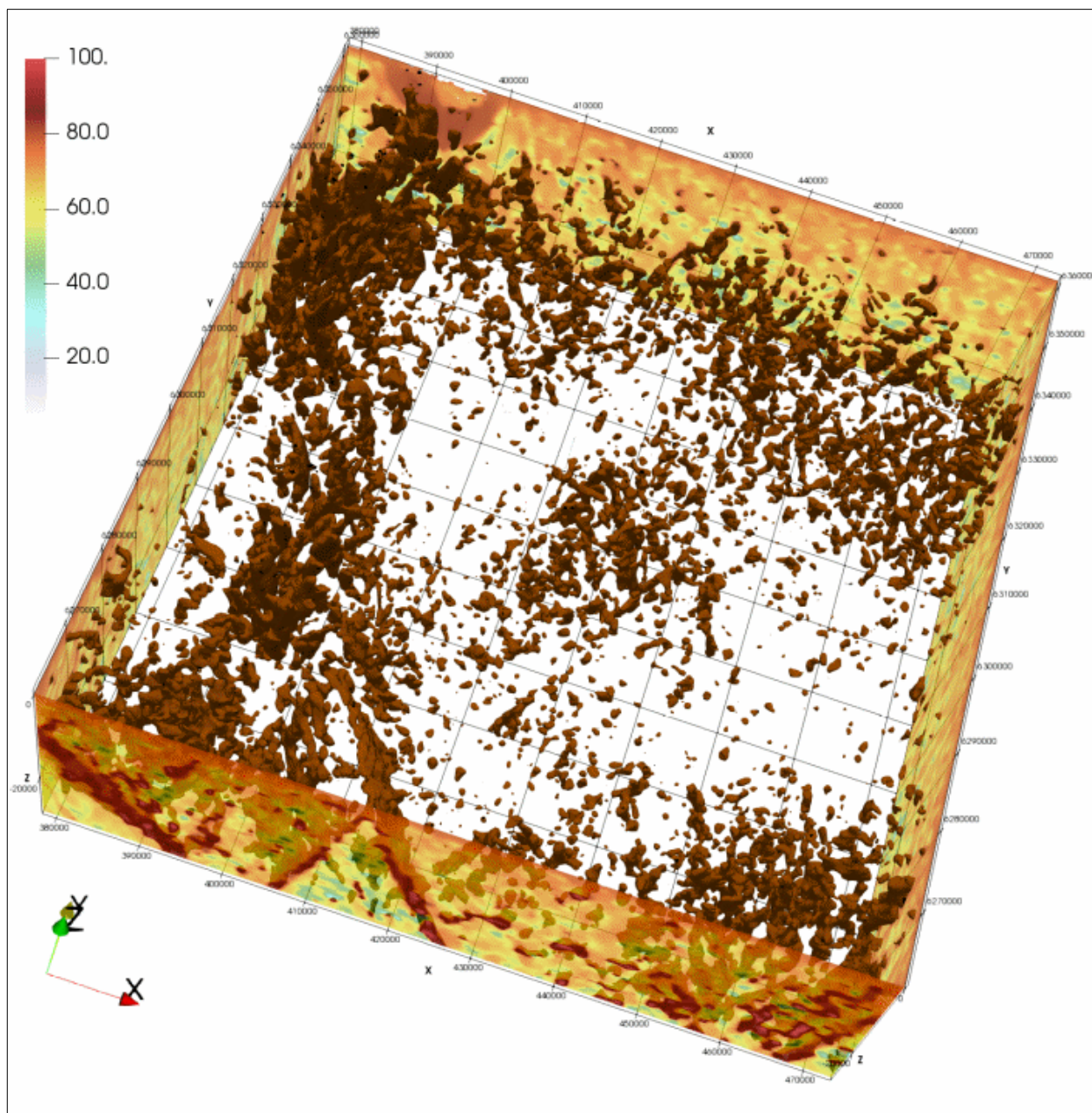


Рис.4 Расчетный 3-D куб нормированных значений с изоповерхностью 80%

По диапазонам нормированных значений более 76% по расчетному 3-D кубу (рис.4, 5) значений прослеживаются основные структуры Ковернинской впадины, в том числе: Пучеж-Городецкий, Узольско-Хохломской, Михайловский и Ковернинский разломы, Сухобезводнинское поднятие с Воротиловским выступом (рис.5). При рассмотрении расчетного 3-D куба в трехмерном пространстве и рассмотрении других значений диапазона 76-100% выделяется и ряд других нарушений параллельных как Пучеж-Городецкому, так и Михайловскому разломам.

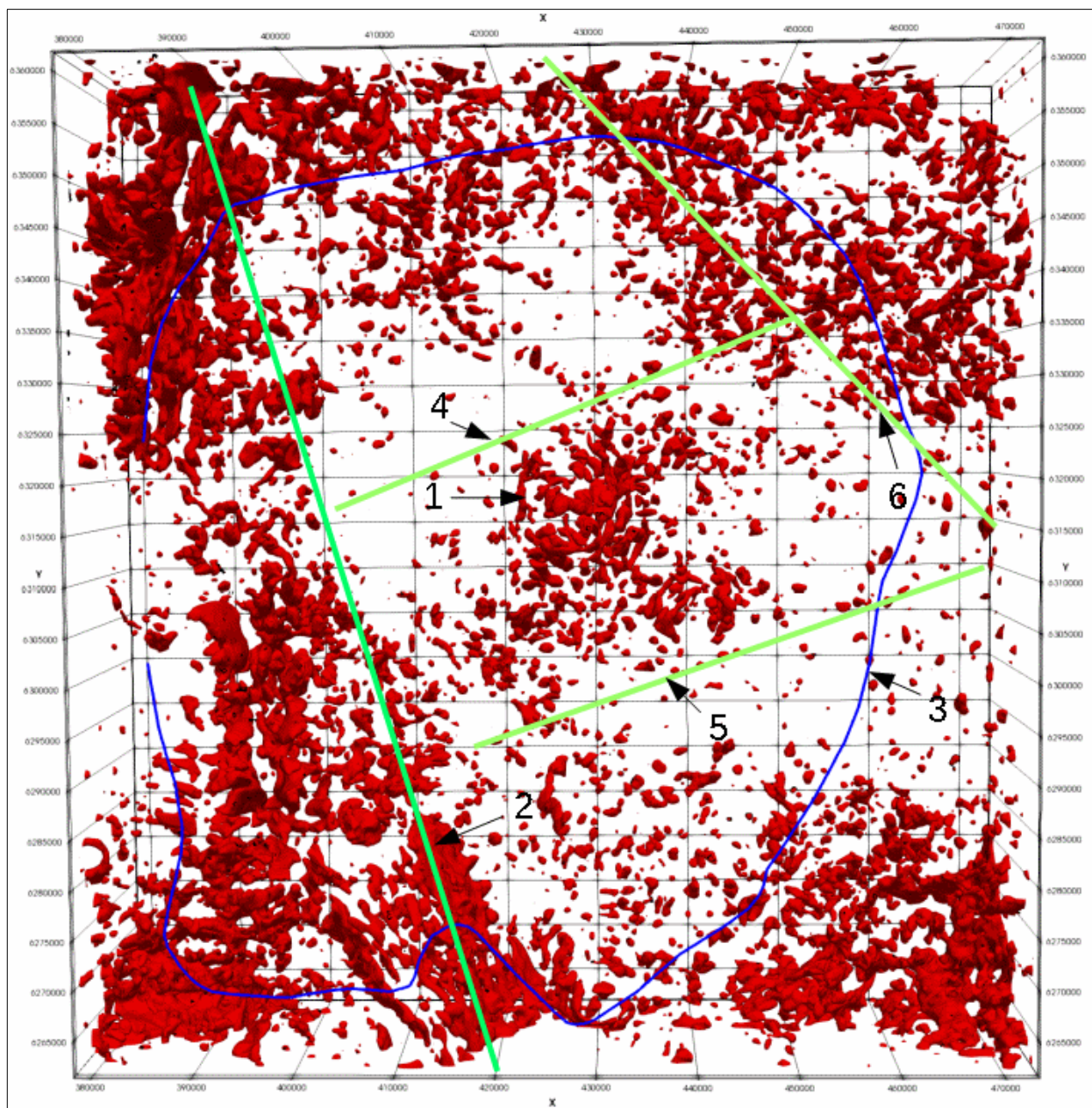


Рис.5 Расчетный 3-D куб нормированных значений с изоповерхностью 80%. Объекты: 1- Воротиловский выступ; 2- Пучеж-Городецкий разлом; 3- граница Ковернинской впадины (5); 4- Михайловский разлом; 5- Уозьско-Хохломской разлом; 6- Ковернинский разлом

В 90-х годах прошлого века по результатам геологосъемочных работ масштаба 1:50 000 и поисково-оценочных работ масштаба 1:25 000 была уточнена структурная карта поверхности фундамента (рис.2). Как наглядно представлено на рис.6 Воротиловский выступ фундамента и строение основания самой Ковернинской впадины достаточно сильно отличаются от классической схемы «импактного кратера». Необходимо отметить отсутствие крупных кольцевых и радиальных разломов, а выявленные тектонические структуры имеют региональный характер и приурочены к зоне сочленения Московской синеклизы и Волго-Уральской антеклизы (Дурандин, 2000).

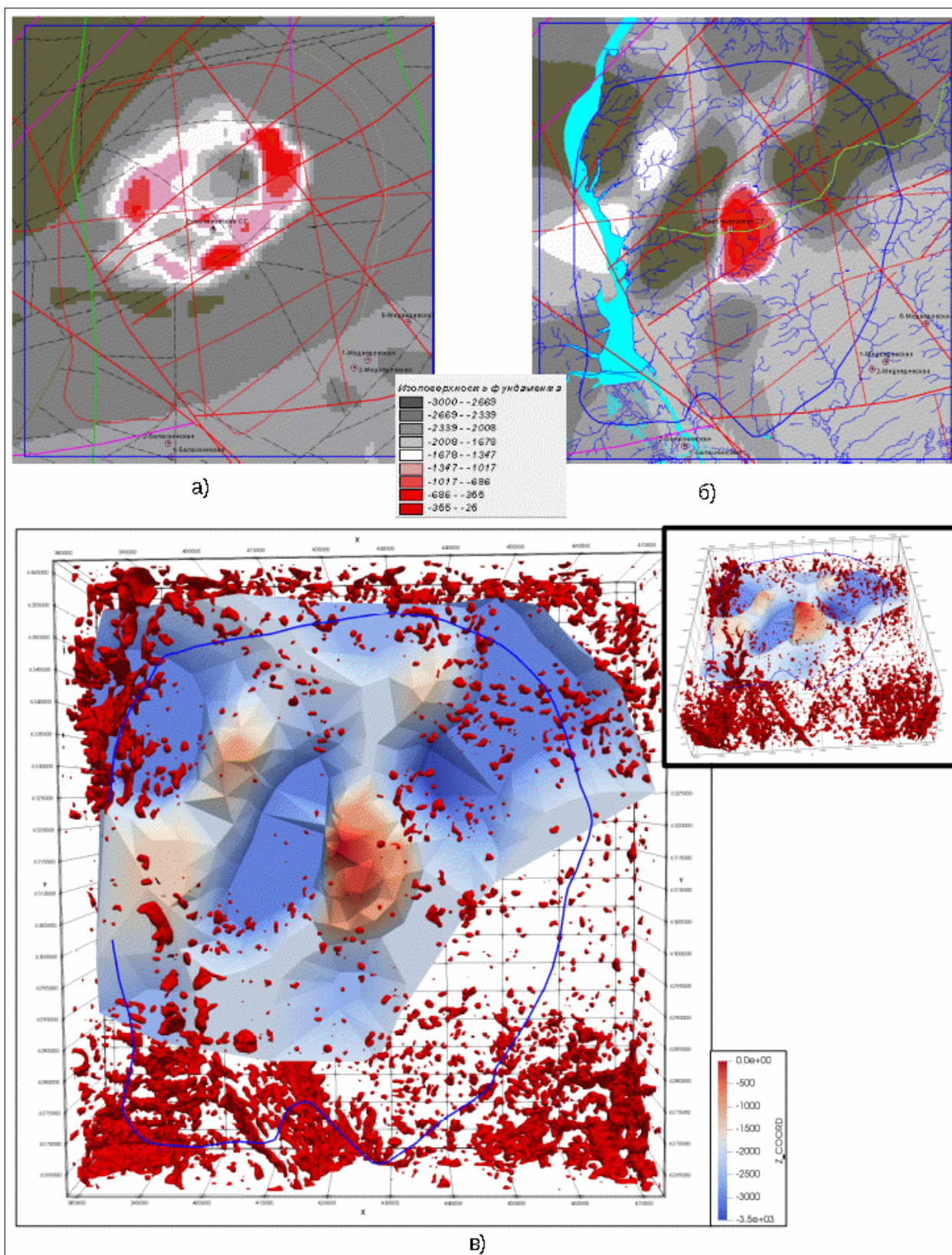


Рис.6 Поверхность фундамента: а) по данным Гостгеолкарты-200 (9), б) по данным работ 1:50 000 (13), в) расчетный 3-D куб нормированных значений с изоповерхностью 80%, совмещенный с моделью поверхности фундамента из рис.2 (13)

Среднемасштабные гравимагнитные данные были так же пересчитаны в нормированный 3-D куб на глубину 20 км. По гравитационным данным выделяются серии дугообразных в разрезе разломов северо-восточного простирания с базисными

поверхностями на глубине более 20 км (рис.7а, б). В меридиональном направлении с глубины около 5 км верхние части дуг разломов опрокинуты и имеют северо-западное падение (рис.7в-е). По диапазону нормированных значений 30-50% в центральной части выделяется основная кальдера и ограничивающий выступ с северо-востока Белбажский грабен, приуроченный к Ковернинскому разлому, большую южную часть Ковернинской впадины занимает глубокий грабен, ограниченный Узольско-Хохломским разломом..

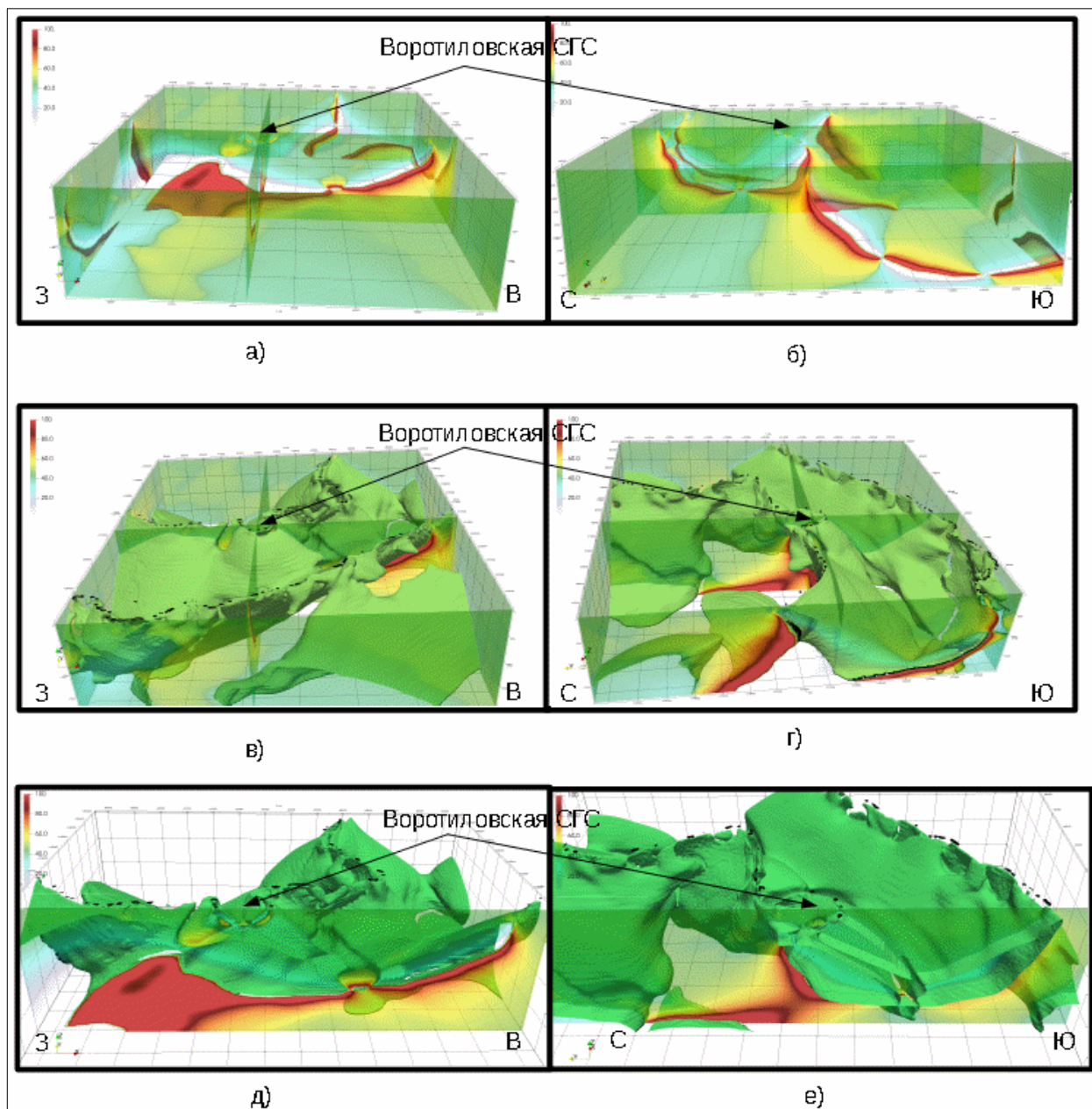


Рис.7 Расчетный 3-D куб нормированных гравиметрических данных до гл.20км: а) широтный разрез, б) меридиональный разрез, в) широтный разрез с изоповерхностью 40%, г) меридиональный разрез с изоповерхностью 40%, д) широтный разрез с обрезанной изоповерхностью 40%, е) меридиональный разрез с обрезанной изоповерхностью 40%

По нормированным магнитометрическим данным, так же пересчитанным на глубину 20 км, сохраняется основное северо-восточное простираие аномалий (рис.8). В

глубокой части грабена выделяется аномалия, образующая вместе с Воротиловской аномалией единое (Сухобезводненское) поднятие рис.8д, е).

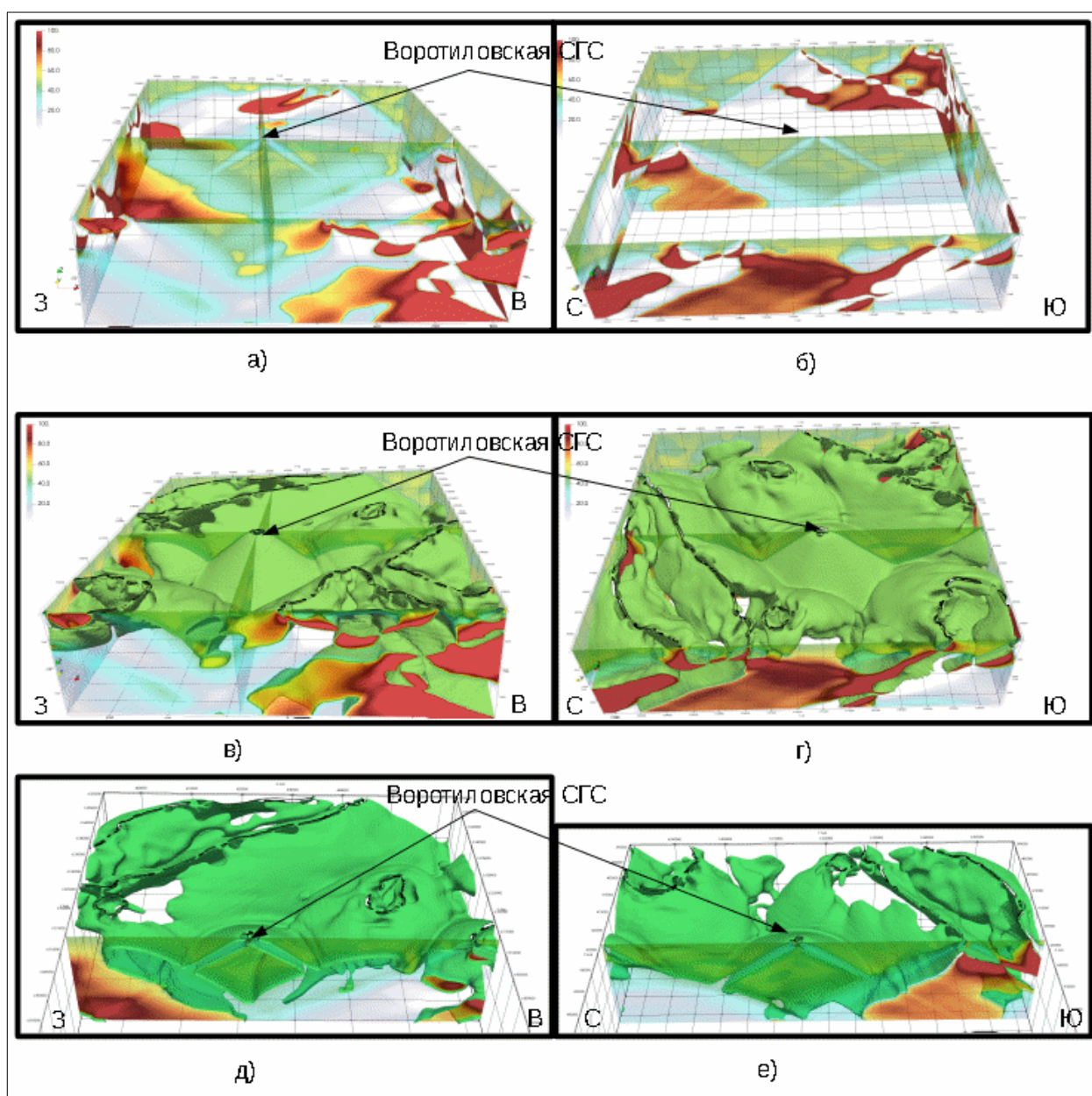


Рис.8 Расчетный 3-D куб нормированных магнитометрических данных до гл.20км: а) широтный разрез, б) меридиональный разрез, в) широтный разрез с изоповерхностью 40%, г) меридиональный разрез с изоповерхностью 40%, д) широтный разрез с обрезанной изоповерхностью 40%, е) меридиональный разрез с обрезанной изоповерхностью 40%

Анализ наземных сейсмических данных по фрагменту Геотраверса (рис.9) показал хорошее совпадение с рассчитанным по «Landsat 8» нормированному 3-D кубу данных.

Комплексный 3-х мерный анализ гравитационных и магнитных данных подтверждает линейный характер распределения гравитационного и магнитного полей с ориентировкой юго-запад — северо-восток, согласующейся с направлениями основных локальных структур и границы с Московской синеклизой (рис.6 б, 10 б, г). На региональном фоне Воротиловский выступ является локальным осложнением как и

Белбажская впадина, образование которых контролировалось Ковернинским разломом (рис.2, 11) северо-западного простирания.

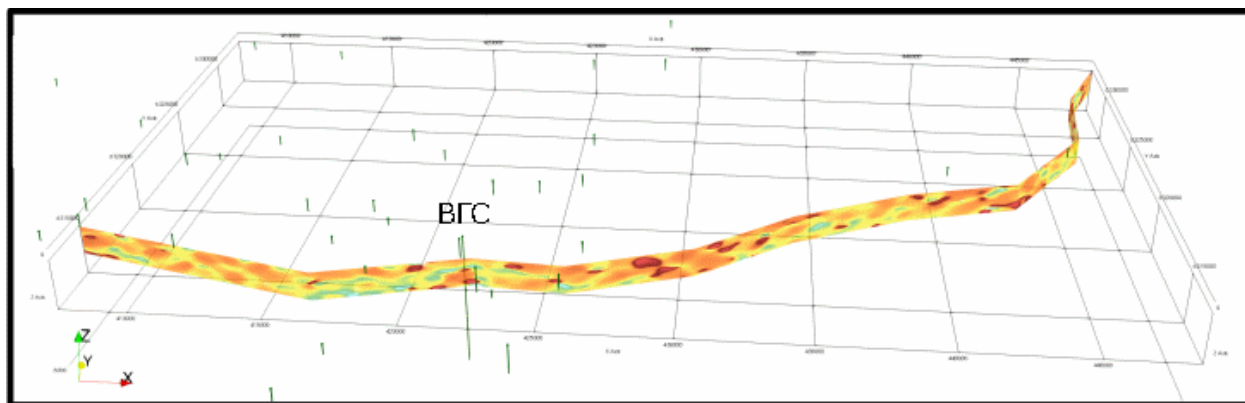


Рис.9 Фрагмент сейсмического профиля геотраверса с вынесенными глубокими скважинами (более 500 м) и Воротиловской скважиной (ВГС)

По расчетным нормированным данным в поле значений 80-100% (рис.10а) выделяется ряд аномальных зон по плотности значений. В юго-западном углу площади по максимальной плотности данных выделяется Пучеж-Городецкий разлом, с падением на северо-восток (рис.4) подчеркнутый линейными зонами градиента (рис.10в).

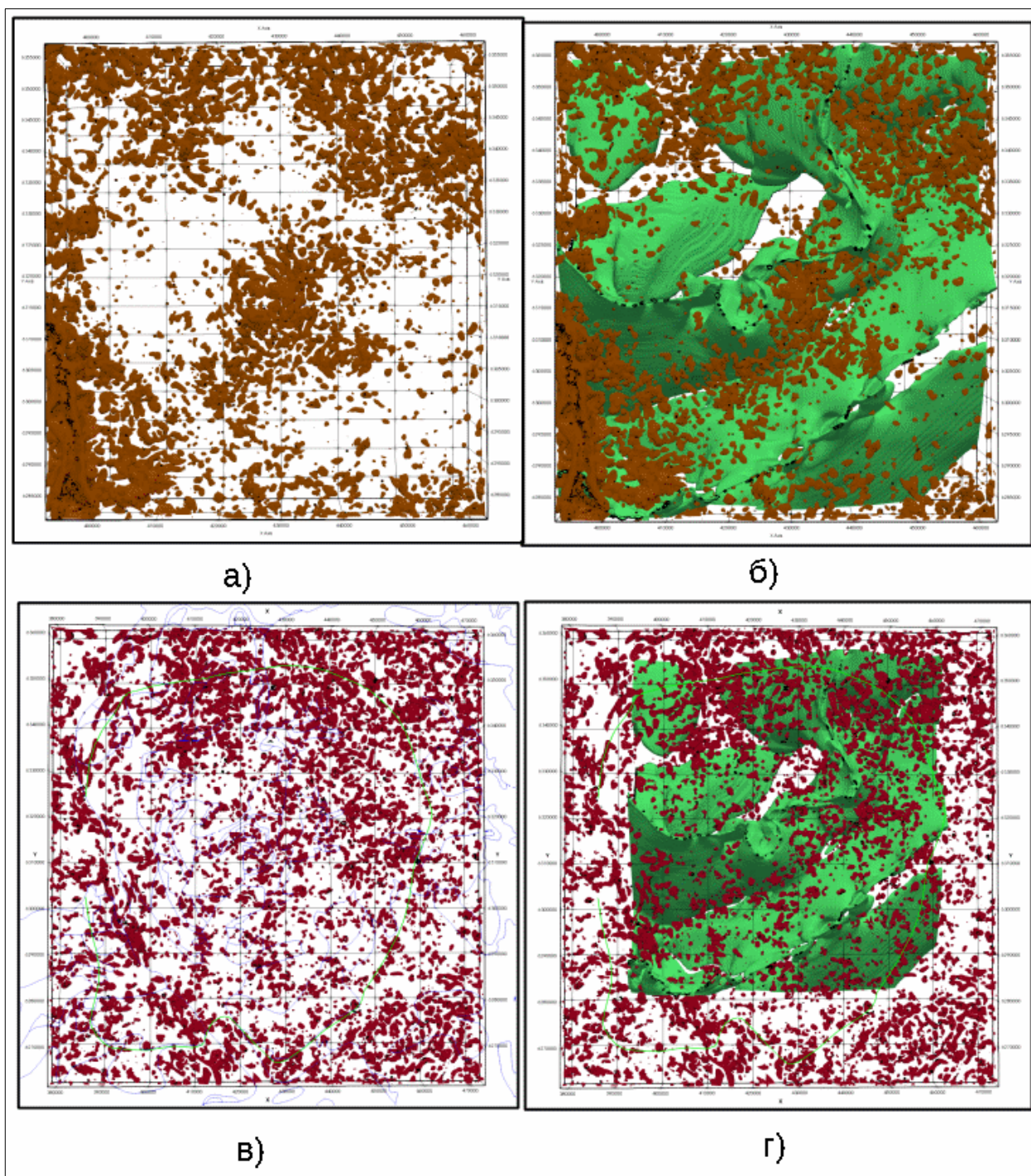


Рис.10 Расчетный 3-D куб нормированных данных по значению 80% (а), совмещенный с 3-D кубом гравиметрических данных (б), градиент расчетного 3-D куба нормированных данных по значению 80% (в), совмещенный с 3-D кубом гравиметрических данных (г)

С юго-западного угла на северо-восток по среднему уровню плотности прослеживается линейное поднятие в центре которого выделяется Воротиловский выступ с центральной кальдерой и ряд более мелких кальдер на фоне понижения гравитационных значений (рис.10а, б). Линейные зоны градиента соответствуют Узольско-Хохломскому и Михайловскому разломам северо-восточного простирания, ограничивающими зону поднятий с юго-востока и северо-запада (рис.10в, г; 11).

Зоны минимальной плотности нормированных данных соответствуют Узольско-Хохломскому (в юго-западной части), Белбажскому (в северной части) и Ковернинскому (в северо-западной части) грабенам (рис.10а).

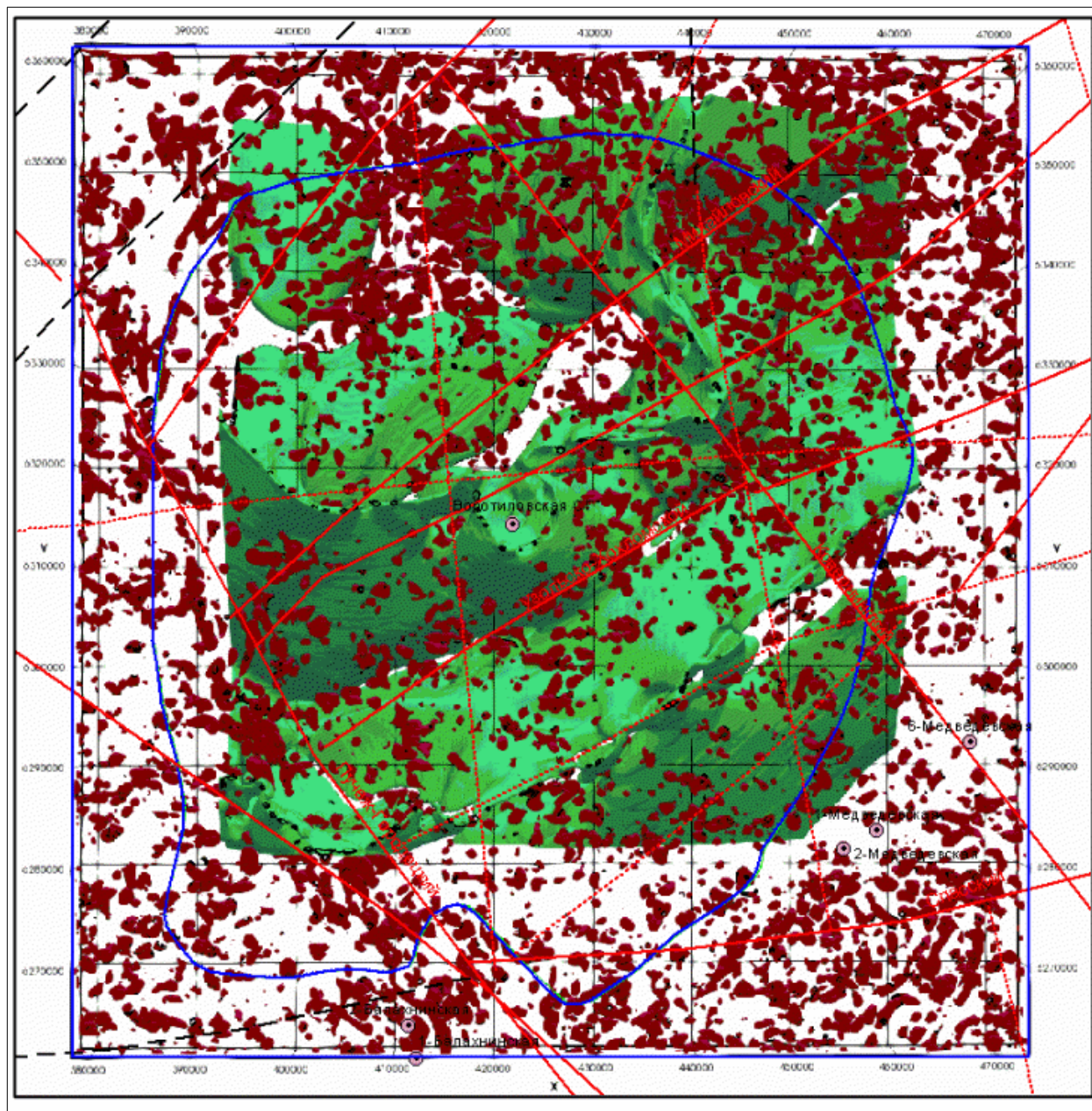


Рис.11 Схема совмещения расчетного 3-D куб градиента нормированных данных и гравиметрических данных с тектонической схемой Ковернинской впадины

Анализ строения Ковернинской впадины исходя из особенностей литологии покровных образований и пород фундамента, тектонического строения территории, геолого-геофизических данных и расчетов нормированных данных космической съемки позволяет существенно дополнить структурно-тектоническую модель ее формирования (рис.12).

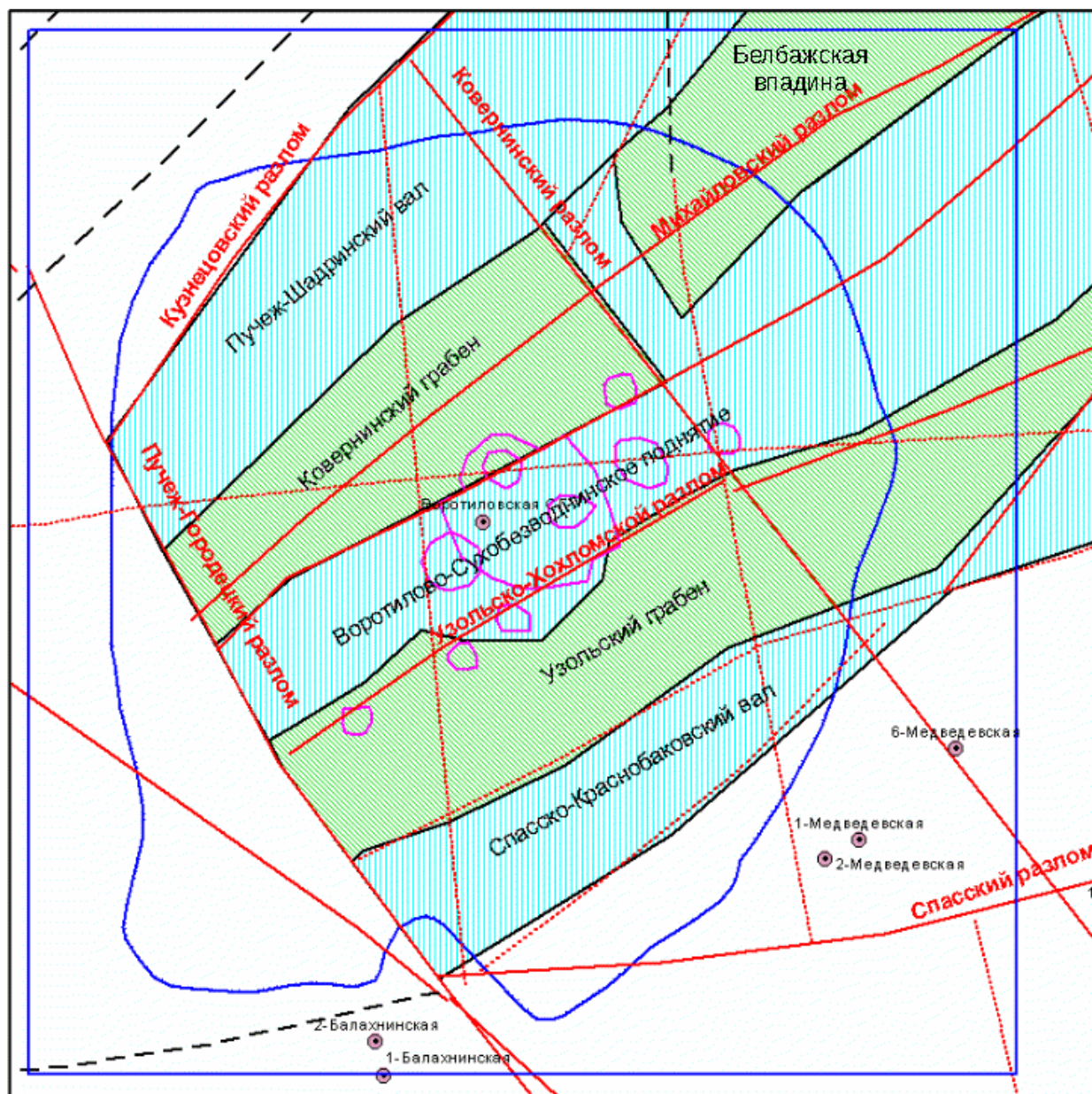


Рис.12 Тектоническая схема Ковернинской впадины, сиреневое — мелкие кольцевые структуры по 3-D кубу нормированных данных 80%, синий квадрат — площадь расчета, синий контур — Ковернинская впадина

Линейный характер основных структур региона не вызывает сомнений, так же как и приуроченность их к зоне сочленения Московской синеклизы и Волго-Уральской антеклизы — Владимирско-Вятская зона дислокаций (Колодяжный, 2013) в состав которой и входит Пучеж-Катунская зона. Проведенный С.Ю.Колодяжным структурно-кинематический анализ подтверждает выявленную стадийность, ориентировку и кинематику основных структур: ось сжатия имеет северо-северо-западную ориентировку, что соответствует восток-северо-восточной ориентировке зон сплющивания (Кузнецовский, Михайловский, Узольско-Хохломской, Спасский разломы), а ось растяжения ортогональна и соответствует Пучеж-Городецкому и Ковернинскому разломам (рис.12).

Общий тектонический план Пучеж-Катунских дислокаций обусловлен динамопарами ортогональных тектонических нарушений, связанных с формированием сдвигово-надвиговой Владимирско-Вятской зоны сочленения Среднерусского коллизионного пояса и Волго-Уральским кратоном. Непосредственно Воротиловский выступ находится в активной зоне Ковернинского разлома, имеющего наклон сместителя на восток-северо-восток. Ковернинская впадина не является кольцевой структурой, изометричную форму ей придали перекрывающие отложения средней юры — мела (рис.1), формировавшиеся на фоне затухающих движений блоков в этой зоне вплоть до конца мезозоя (Колодяжный, 2013).

Данные по Воротиловской сверхглубокой скважине (Глубокое бурение... 1999, Певзнер, 1999) свидетельствуют только о взрывном характере происходившего процесса (Дурандин, 2000), а приводимые данные о снижении амплитуд ударного воздействия с 50 ГПа у поверхности до 10 ГПа на глубине 3,2 км и присутствие зон бластомилонитов (кристаллосланцы) и следов плавления исходных пород «in situ» свидетельствуют (Глубокое бурение... 1999, Колодяжный 2013, Певзнер, 1999) о выходе скважины из зоны влияния наклонного основного жерла. Установленное наличие помимо основного кратера ряда вспомогательных кратеров свидетельствует о многоактности и периодичности взрывных эксплозий. Оценка термального воздействия так же свидетельствует о выходе скважины из зоны влияния основного жерла эксплозии.

Выводы

1. Пучеж-Катунская зона дислокаций возникла в результате длительного проявления циклических тектонических процессов, связанных с формированием зоны сочленения Среднерусского авлакогена (коллизионного пояса) и Волго-Уральской антеклизой (кратоном).
2. Пучеж-Катунская зона дислокаций и Воротиловский выступ являются максимальным проявлением типичного для Восточно-Европейской платформы внутриплитного тектоногенеза (Сурско-Камская зона, Рыбинско-Сухонская зона).
3. Ковернинская впадина не является кольцевой структурой, изометричную форму ей придали перекрывающие отложения средней юры — мела, формировавшиеся на фоне затухающих движений блоков вплоть до конца мезозоя.
4. Возможно использование данных ДДЗ для решения модифицированной обратной задачи - нахождение градиента плотности среды. Преимущество рассмотрения такой модифицированной задачи заключается в возможности разделения локальной

(высокочастотной) и региональной (низкочастотной) пространственных компонент гравитационного. Точность решения модифицированной задачи по выбранной компоненте поля определяется как его отличие от решения по полному полю и контролируется стандартным методом оценки сходимости при уплотнении пространственной сетки.

Литература

1. *Валеев Р.Н.* Тектоника Волго-Камского междуречья. //Тр. Геол. ин-та. Казань. Вып. 12. М.: Недра, 1968. 117 с.
2. *Валеев Р.Н.* Авлакогены Восточно-Европейской платформы. //М.: Недра, 1978. 152 с.
3. *Варданянц Л.А.* Трубка взрыва в центральной части Русской платформы. //Изв. АН АрмССР. 1961. Т. 14, № 2. С. 57-62
4. Геология СССР. Т. 11. Поволжье и Прикамье. Ч. 1. Геологическое описание. М.: Недра, 1967. 872 с.
5. ГИС-Атлас «Недра России», ПФО, Нижегородская область, ВСЕГЕИ, 2017, <http://atlaspacket.vsegei.ru/#3fc4a7d629b3751f11>)
6. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. Т. 2. //М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. 400 с.
7. Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре. Ред. В.Л. Масайтис, Л.А. Певзнер. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 599 с.
8. *Горецкий Г.И.* К познанию природы Пучежско-Балахнинских дислокаций (о проявлениях инъективной тектоники на Русской платформе). //Бюл. МОИП. Отд. геол. 1962. Т. 37, вып. 5. С. 80-110.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000 (Н.С.). Лист 0-38-XXVI. Пучеж. Объяснит, зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 1975
10. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000 Издание второе. Серия Средневожская. Лист 0-38-XXVII (Семенов). Объяснит, зап. М.: Моск. филиал ВСЕГЕИ, 2018
11. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (Н.С.). Лист 0-37, (38). Нижний Новгород. Объяснит, зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 261 с.
12. *Гульельми А.В.* Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и магнитосфере Земли. //Успехи физических наук, декабрь 2007 г., том 177, №12. С.1257-1276
13. *Дурандин А.В.* Геология и перспективы алмазоносности Пучеж-Катунской зоны. //Разведка и охрана недр, 2000 г. № 10. С.28-32.
14. *Дурандин А.В., Калинин А.Т.* Интерпретация гравитационного и магнитного полей на основе компьютерных ГИС-технологий. //Разведка и охрана недр, 2000 г. № 10. С.34-37.
15. *Дурандин А.В.* Структурно-тектонический анализ данных дистанционного зондирования Земли. //Геоматика, 2011 г., №1. С.48-51.
16. Ишанкулов М.Ш., Рахимжанов Б.К. ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИССЛЕДОВАНИИ МЕГАКОНУСНЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАЗАХСТАНЕ // Современные проблемы науки и образования. – 2010. –№ 3, С. 137-146 <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4492>

17. Канушин, В.Ф. Моделирование аномалий силы тяжести с учетом данных о рельефе Земли в условиях неполной гравиметрической изученности // тема диссертации и автореферата по ВАК 05.24.01, 1984, 293 с.
<http://www.dissercat.com/content/modelirovanie-anomalii-sily-tyazhesti-s-uchetom-dannykh-o-relefe-zemli-v-usloviyakh-nepolnoi>
18. Колодяжный С.Ю. К вопросу о генезисе Пучеж-Катунской структуры (Восточно-Европейская платформа). // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2013. Т. 88, вып. 6. С. 3-17.
19. Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематические парагенезы в осадках фанерозойского чехла Среднерусской зоны дислокаций. // Геотектоника. 2010. № 2. С. 56—76.
20. Колодяжный С.Ю. Структуры латерального течения северо-восточной части Восточно Европейской платформы. Ст. 1. Особенности геологического строения, структурные парагенезы фундамента. // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2012. Т. 87, вып. 1. С. 15-24.
21. Колодяжный С.Ю. Структуры латерального течения северо-восточной части Восточно Европейской платформы. Статья 2. Структурные парагенезы осадочного чехла. // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2012. Т. 87, вып. 2. С. 3-16.
22. Копп М.Л. Вятские дислокации: динамика формирования и выражение в новейшей структуре (Восточно-Европейская платформа). // Геотектоника. 2012. № 6. С. 55-77.
23. Лукьянов А. В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М.: Наука, 1965. 212 с.
24. Маракушев А.А., Богатырев О.С. Феногенов А.Л. Формирование Пучеж-Катунской кольцевой структуры на Русской платформе. // Докл. АН. 1993. Т. 328, № 3. С. 364—368.
25. Масайтис В.Л. Пучеж-Катунская астроблема. Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. С. 59-69.
26. Нечитайло С.К., Веселовская М.М., Скворцова Е.Н. Материалы по геологии Городецко-Ковернинской тектонической зоны. М.: Гостоптехиздат, 1959. 128 с.
27. Орлов, Всеволод Константинович Анализ и выделение связи аномалий Буге с высотами рельефа // тема диссертации и автореферата по ВАК 01.04.12, 1984, Ленинград, 149с. <http://www.dissercat.com/content/analiz-i-vydelenie-svyazi-anomalii-buge-s-vysotami-relefa>
28. Оскорбин Н.М., Суханов С.И. СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ, 2013 // ИЗВЕСТИЯ АЛТАЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА [HTTPS://CYBERLENINKA.RU/ARTICLE/N/SOZDANIE-TSIFROVOY-MODELI-MESTNOSTI-NA-OSNOVE-KOSMICHESKIH-SNIMKOV-VYSOKOGO-RAZRESHENIYA](https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-tsifrovoiy-modeli-mestnosti-na-osnove-kosmicheskikh-snimkov-vysokogo-razresheniya)
29. Павлович В.Н., Богданов Ю.А., Шуман В.Н., Ващенко В.Н. Электродинамика тектонических процессов и электромагнитное профилирование земной коры в Антарктическом регионе. // Украинский антарктический журнал, 2009 г., №8. С.154-170
30. Певзнер Л.А., Воронцов А.К., Галкина О.Б. Геология и алмазоносность Пучеж-Катунской импактной структуры. // Разведка и охрана недр, 1999 г. № 11, с.18-23.
31. Песков Е.Г. Пояса взрывных структур («астроблем»). // Геотектоника. 1992. № 5. С. 20—26.
32. Соловьёв В.К. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:1000000. Лист 0-38 (Горький). М.: Госгеолтехиздат, 1958. 112 с.
33. Сусанина О.М. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ДОЮРСКОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ И МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ // Автореферат диссертации, Москва-2012

- <http://earthpapers.net/geologicheskoe-stroenie-doyurskogo-kompleksa-zapadnoy-sibiri-po-gravimetricheskim-i-magnitometricheskim-dannym>
34. *Туманов Р.Р.* Новые данные о строении Городецко-Ковернинской тектонической зоны.//Материалы по геологии востока Русской платформы. Вып. 5. Казань: Изд-во Казанского университета, 1973. С. 112—125.
 35. *Шуман В.Н.* Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах.//Геофизический журнал, 2007 г. № 2. С. 3—16
 36. *Фивенский Ю.И.* Использование материалов аэрокосмических съемок для изучения земной коры.//Геодезия и картография №1, 2006. С. 44-52
 37. *Фивенский Ю.И.* Малые кольцевые структуры рыхлых отложений земной коры.//Научное открытие. Диплом ОТП РАН №02-д02 от 22 октября 2002 г.
 38. *Фирсов Л. В.* О метеоритном происхождении Пучеж-Катунского кратера.//Геотектоника. 1965. № 2. С. 106—118.
 39. *Huber K., Fuchs K., Palmer J. et al.* Analysis of borehole televiwer measurements in the \brotilov drillhole, Russia — first results.//Tectonophysics. 1997. bl. 275, N 1-3. P. 261-272.
 40. *Quinto E. T.*, Radon transforms on curves in the plane, Lectures in Applied Mathematics: Tomography, Impedance Imaging and Integral Geometry, 30 (1994), pp.231-244.
 41. *Lebedev S.A.*, Satellite altimetry in the Earth Sciences, // Adv. Space Res. / Moscow, Russia. 2013. V.10. No3. Pp.33–49. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1206&lang=eng>
 42. *Marrett R.A., Allmendinger R. W.* Kinematic analysis of fault- slip data//J. Structural Geol. 1990. \fol. 12. P. 973—986.
 43. *Palfy J.* Did the Puchezh-Katunki impact trigger an extinction? H. Dypvik (ed). Cratering in Marine Environments and on Ice. Berlin: Springer, 2004. P. 135-148.
 44. *Pilkington M.*, Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, Eds. David Gubbins, Emilio Herrero-Bervera, 2007, <http://libgen.io/book/index.php?md5=A836B62013CC925791D436F201A4FDA5>
 45. *Saxov, S., & Nygaard, K.* RESIDUAL ANOMALIES AND DEPTH ESTIMATION. //GEOPHYSICS, 18(4), 913–928, (1953). doi:10.1190/1.1437945
 46. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. B11. P. 21803–21824.

The solution of a modified inverse problem of geopotential fields based on remote sensing data on the example of the reconstruction of the structural-tectonic framework of the Puchezh-Katunka dislocation zone

A.V.Durandin <https://orcid.org/0000-0001-6468-9757> (ORCID)

E-mail: durandin.andrew@gmail.com

A.O.Pechnikov <https://orcid.org/0000-0001-9626-8615> (ORCID)

E-mail: pechnikov@mobigroup.ru

A large number of the latest geological and geophysical data made it possible to re-analyze the geological structure of the Puchezh-Katun dislocation zone using the original technology of reconstruction of the structural-tectonic framework of the territories. The Puchezh-Katun Dislocation Zone arose as a result of the long-term manifestation of cyclic tectonic processes associated with the formation of the junction zone of the Central Russian aulacogen and the Volga-Ural antecline. The dislocation zone and the Vorotilov ledge are the maximum manifestation of intraplate tectonogenesis typical of the East European platform. The Koverninskaya depression is not a ring structure, the isometric form was given to it by overlying sediments of the Middle Jurassic - Cretaceous, formed against the background of damped block movements until the end of the Mesozoic.

Keywords: Puchezh-Katun dislocation zone, Koverninskaya depression, Vorotilovsky ledge, Vorotilovskaya ultradeep well.

References

1. Valeev R.N. Tektonika Volgo-Kamskogo mezhdurech'ya (*Tectonics of the Volga-Kama interfluve*), Tr. Geol. in-ta. Kazan'. Vyp. 12. M.: Nedra, 1968. 117 p.
2. Valeev R.N. Avlakogeny Vostochno-Evropejskoj platformy (*Aulacogenes of the East European Platform*), M.: Nedra, 1978. 152 s.
3. Vardanyanc L.A. Trubka vzryva v central'noj chasti Russkoj platformy (*Blast tube in the central part of the Russian platform*), Izv. AN ArmSSR. 1961. T. 14, № 2. S. 57-6.
4. Geologiya SSSR. T. 11. Povolzh'e i Prikam'e. CH. 1. Geologicheskoe opisanie. M.: Nedra, 1967. 872 p.
5. GIS-Atlas «Nedra Rossii», PFO, Nizhegorodskaya oblast', VSEGEI, 2017, <http://atlaspacket.vsegei.ru/#3fc4a7d629b3751f11>
6. Glubinnoe stroenie, ehvolyuciya i poleznye iskopaemye rannedokembrijskogo fundamenta Vostochno-Evropejskoj platformy: Interpretaciya materialov po opornomu profilyu 1-EV, profilyam 4V i TATSEJS (*Depth structure, evolution and minerals of the Early Precambrian basement of the East European Platform: Interpretation of materials on the reference profile 1-EB, profiles 4B and TATSEYS*). T. 2, M.: GEOKART: GEOS, 2010. 400 p.
7. Glubokoe burenie v Puchezh-Katunkskoj impaktnoj strukture (*Deep drilling in the Puchezh-Katunka impact structure*). Red. V.L. Masajtis, L.A. Pevzner. SPb.: Izd-vo VSEGEI, 1999. 599 p.
8. Goreckij G.I. K poznaniyu prirody Puchezhsko-Balakhninskih dislokacij (o proyavleniyah in'ektivnoj tektoniki na Russkoj platforme) (*To the knowledge of the nature of the Puchezh-Balakhna dislocations (on the manifestations of injective tectonics on the Russian platform)*), Byul. MOIP. Otd. geol. 1962. T. 37, vyp. 5. pp. 80-110.

9. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii (*State geological map of the Russian Federation*). M-b 1:200 000 (N.S.). List 0-38-XXVI. Puchezh. Ob'yasnit, zap. SPb.: VSEGEI, 1975

10. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii (*State geological map of the Russian Federation*). M-b 1:200 000 Izdanie vtoroe. Seriya Srednevolzhskaya. List 0-38-XXVII (Semenov). Ob'yasnit, zap. M.: Mosk.filial VSEGEI, 2018

11. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii (*State geological map of the Russian Federation*). M-b 1:1 000 000 (N.S.). List 0-37, (38). Nizhnij Novgorod. Ob'yasnit, zap. SPb.: VSEGEI, 2000. 261 p.

12. Gul'el'mi A.V. Ul'tranizkochastotnye ehlektromagnitnye volny v kore i magnitosfere Zemli (*Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the Earth's crust and magnetosphere*), Uspekhi fizicheskikh nauk, dekabr' 2007 g., tom 177, №12. Pp.1257-1276

13. Durandin A.V. Geologiya i perspektivy almazonosnosti Puchezh-Katunskoj zony (*Geology and diamond prospects of the Puchezh-Katun zone*), Razvedka i ohrana neдр, 2000 g. № 10. Pp.28-32.

14. Durandin A.V., Kalinin A.T. Interpretaciya gravitacionnogo i magnitnogo polej na osnove komp'yuternyh GIS-tehnologij (*Interpretation of the gravitational and magnetic fields based on computer GIS technologies*), Razvedka i ohrana neдр, 2000 g. № 10. Pp.34-37.

15. Durandin A.V. Strukturno-tektonicheskij analiz dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli (*Structural-tectonic analysis of Earth remote sensing data*), Geomatika, 2011 g., №1. Pp.48-51.

16. Kolodyazhnyj S.YU. K voprosu o genezise Puchezh-Katunskoj struktury (Vostochno-Evropejskaya platforma) (*To the question of the genesis of the Puchezh-Katun structure (East European Platform)*), Byul. MOIP. Otd. geol. 2013. T. 88, vyp. 6. Pp. 3-17.

17. Kolodyazhnyj S.YU. Strukturno-kinematicheskie paragenezy v osadkah fanerozojskogo chekhla Srednerusskoj zony dislokacij (*Structural-kinematic parageneses in the sediments of the Phanerozoic cover of the Central Russian dislocation zone*), Geotektonika. 2010. № 2. Pp. 56—76.

18. Kolodyazhnyj S.YU. Struktury lateral'nogo techeniya severo-vostochnoj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy . St. 1. Osobennosti geologicheskogo stroeniya, strukturnye paragenezy fundamenta, (*Structures of the lateral flow of the northeastern part of the East European Platform. Art. 1. Features of the geological structure, structural paragenesis of the basement*) Byul. MOIP. Otd. geol. 2012. T. 87, vyp. 1. Pp. 15-24.

19. Kolodyazhnyj S.YU. Struktury lateral'nogo techeniya severo-vostochnoj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy (Structures of the lateral flow of the northeastern part of the East European Platform). Stat'ya 2. Strukturnye paragenezy osadochnogo chekhla (*Structures of the lateral flow of the northeastern part of the East European Platform. Article 2. Structural paragenesis of sedimentary cover*), Byul. MOIP. Otd. geol. 2012. T. 87, vyp. 2. Pp. 3-16.

20. Kopp M.L. Vyatskie dislokacii: dinamika formirovaniya i vyrazhenie v novejshej strukture (Vostochno-Evropejskaya platforma) (*Vyatka dislocations: the dynamics of formation and expression in the newest structure (East European Platform)*), Geotektonika. 2012. № 6. Pp. 55-77.

21. Luk'yanov A. V. Strukturnye proyavleniya gorizontal'nyh dvizhenij zemnoj kory (*Structural manifestations of horizontal movements of the earth's crust*). M.: Nauka, 1965. 212 p.

22. Marakushev A.A., Bogatyrev O.S. Fenogenov AL. Formirovanie Puchezh-Katunskoj kol'cevoj struktury na Russkoj platforme (*Formation of the Puchezh-Katunsky ring structure on the Russian platform*), Dokl. AN. 1993. T. 328, № 3. Pp. 364—368.

23. Masajtis V.L. Puchezh-Katunskaya astroblema (*Puchezh-Katunka Astrobleme*). Geologiya astroblem. L.: Nedra, 1980. Pp. 59-69.

24. Nechitajlo S.K., Veselovskaya M.M., Skvorcova E.N. Materialy po geologii Gorodecko-Koverninskoj tektonicheskoy zony (*Materials on geology of the Gorodetsko-Koverninsky tectonic zone*). M.: Gostoptekhizdat, 1959. 128 p.

25. Pavlovich V.N., Bogdanov YU.A., SHuman V.N., Vashchenko V.N. Ehlektrodinamika tektonicheskikh processov i ehlektromagnitnoe profilirovanie zemnoj kory v Antarkticheskom regione (*Electrodynamics of tectonic processes and electromagnetic profiling of the Earth's crust in the Antarctic region*), Ukrainskij antarkticheskij zhurnal, 2009 g., №8. Pp.154-170
26. Pevzner L.A., Voroncov A.K., Galkina O.B. Geologiya i almazonosnost' Puchezh-Katunskoj impaktnoj struktury.//Razvedka i ohrana neдр, 1999 g. № 11, Pp.18-23.
27. Peskov E.G. Poyasa vzryvnyh struktur («astroblem»), Geotektonika. 1992. № 5. Pp. 20—26.
28. Solov'yov V.K. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:1000000. List 0-38 (Gor'kij). M.: Gosgeoltekhizdat, 1958. 112 p.
29. Tumanov P.P. Novye dannye o stroenii Gorodecko-Koverninskoj tektonicheskoy zony.//Materialy po geologii vostoka Russkoj platformy. Vyp. 5. Kazan': Izd-vo Kazanskogo universiteta, 1973. Pp. 112—125.
30. Shuman V.N. Ehlektromagnitnye signaly litosfernogo proiskhozhdeniya v sovremennyh nazemnyh i distancionnyh zondiruyushchih sistemah.//Geofizicheskij zhurnal, 2007 g. № 2. Pp. 3—16
31. Fivenskij YU.I. Ispol'zovanie materialov aehrokosmicheskikh s"emok dlya izucheniya zemnoj kory.//Geodeziya i kartografiya №1, 2006. Pp. 44-52
32. Fivenskij YU.I. Malye kol'cevyje struktury ryhlyh otlozhenij zemnoj kory., Nauchnoe otkrytie. Diplom OTP RAN №02-d02 ot 22 oktyabrya 2002 g.
33. Firsov L. V. O meteoritnom proiskhozhdenii Puchezh-Katunskogo kratera.//Geotektonika. 1965. № 2. Pp. 106—118.
34. Huber K., Fuchs K., Palmer J. et al. Analysis of borehole televiwer measurements in the \ brotilov drillhole, Russia — first results.//Tectonophysics. 1997. bl. 275, N 1-3. P. 261-272.
35. Marrett R.A., Allmendinger R. W. Kinematic analysis of fault- slip data//J. Structural Geol. 1990. \fol. 12. P. 973—986.
36. Palfy J. Did the Puchezh-Katunki impact trigger an extinction? H. Dypvik (ed). Cratering in Marine Environments and on Ice. Berlin: Springer, 2004. P. 135-148.
37. Saxov, S., & Nygaard, K. RESIDUAL ANOMALIES AND DEPTH ESTIMATION. //GEOPHYSICS, 18(4), 913–928, (1953). doi:10.1190/1.1437945