

А.В. Дурандин

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

А.О.Печников

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

## **Геологическое строение Пучеж-Катунской зоны дислокаций по данным космического зондирования**

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 (6; 7). 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 (22). Одновременно появились гипотезы о взрывном (22, 24, 30) и вулканотектоническом происхождении данной структуры (3, 21, 23) и как о многофазной эксплозивной структуре, развивавшейся от поздней перми до средней юры (27). Серьезными доводами в пользу этих представлений являются приуроченность структуры к протяженной зоне тектонических нарушений и длительный период ее развития (1, 2, 4, 8, 23) (рис.1).

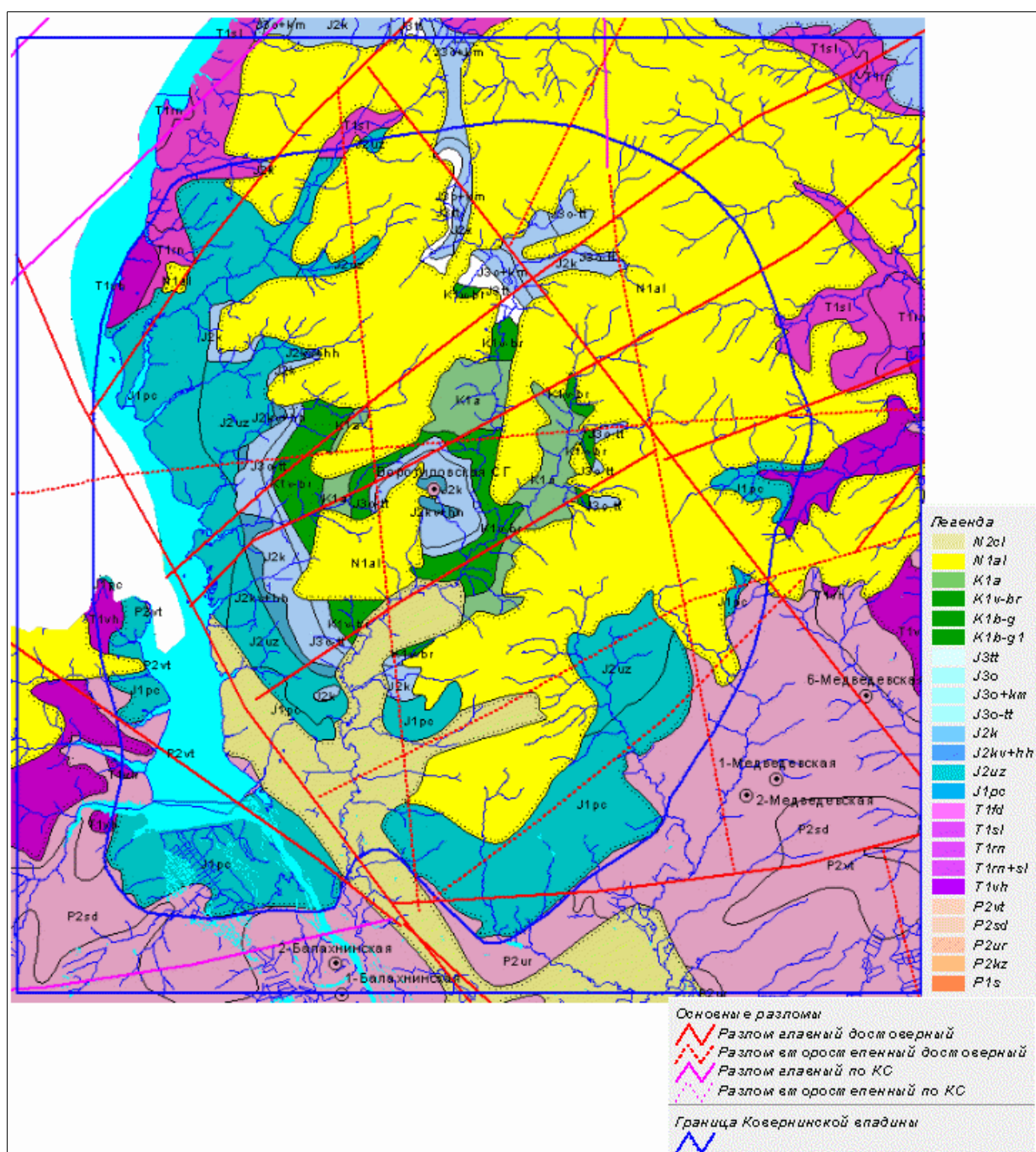


Рис.1 Фрагмент геологической карты Пучеж-Катунской зоны дислокаций (из ГИС-Атласа «Недра России», ПФО, Нижегородская область, ВСЕГЕИ, 2017, <http://atlaspacket.vsegei.ru/#3fc4a7d629b3751f11>)

В 90-х годах прошлого века по результатам геологической съемки масштаба 1:50000 автором было установлено динамометаморфическое происхождение так называемой «фангломератовой толщи» (16) (Пучеж-Воротилковский динамометаморфический комплекс) и наличие на Воротилковском выступе субвулканического Эмохонского комплекса (13). 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 эпизоде подобные зоны вырождаются в серии листрических надвигов с единой глубинной поверхностью срыва. Снижение динамической нагрузки в базисной зоне при сохранении импульсного режима подвижек в эпизоде и превышения давления флюида над литостатическим давлением привело в ааленское время к неоднократным газowo-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 (13) (рис.2)

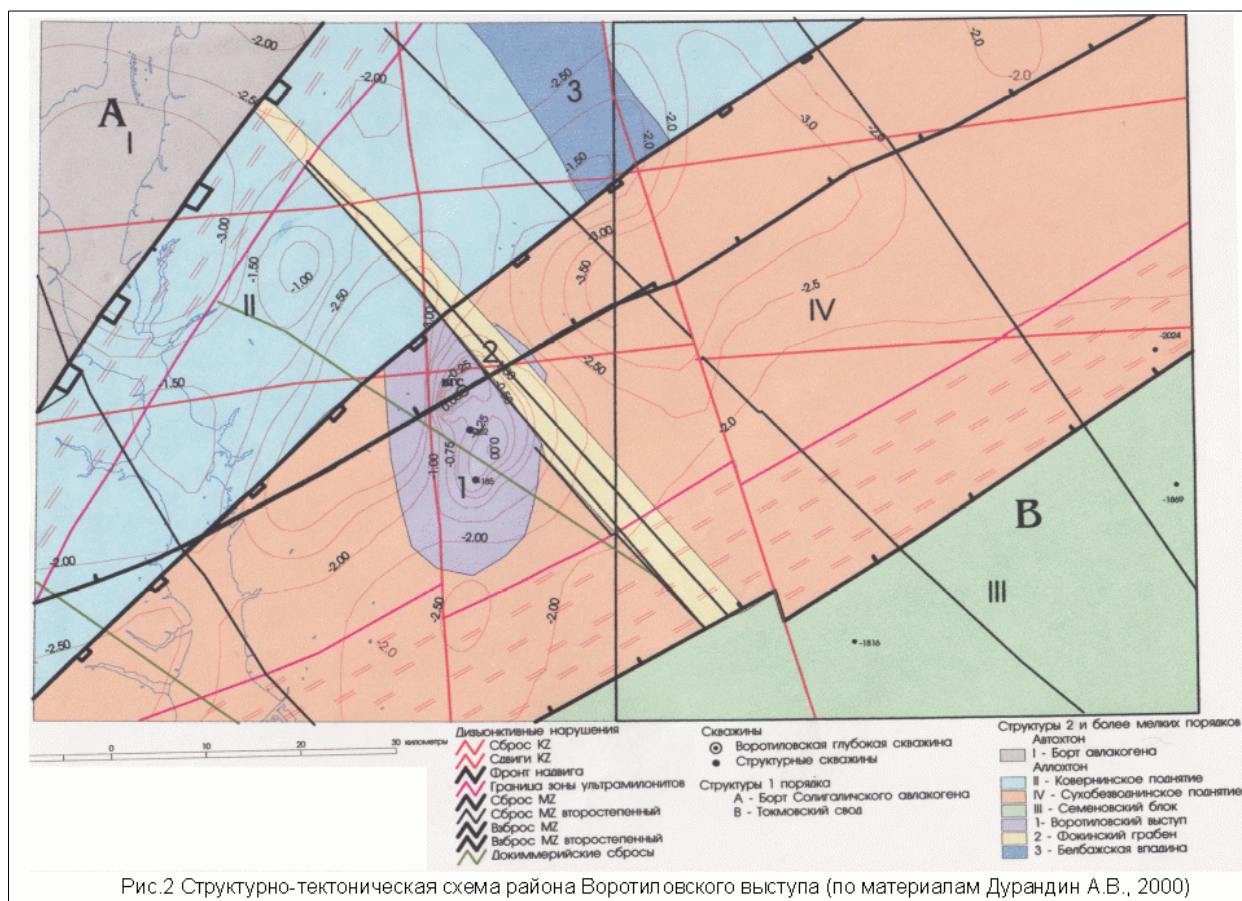
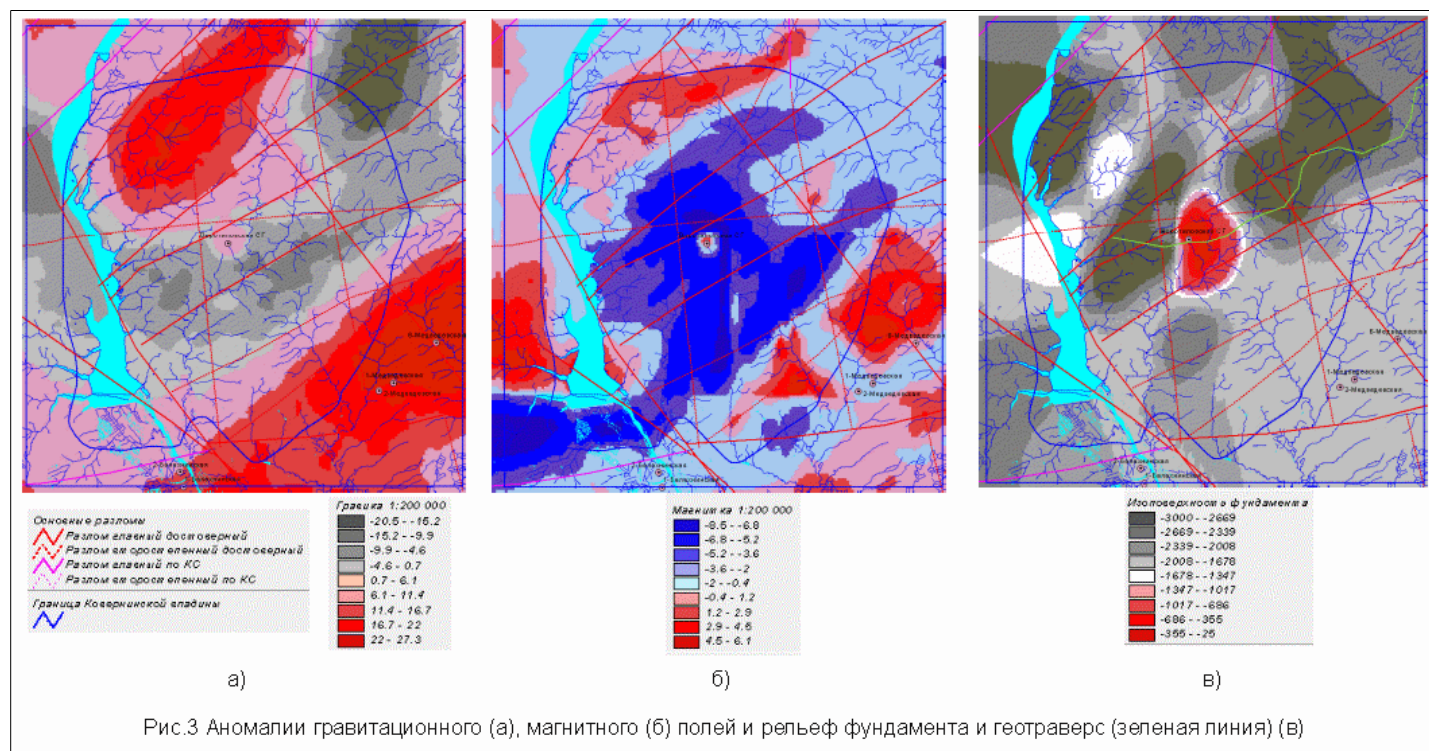


Рис.2 Структурно-тектоническая схема района Воротиловского выступа (по материалам Дурандин А.В., 2000)



Через район Пучеж-Катунских дислокаций проходит региональный геофизический профиль (геотраверс) (6) с комплексом сейсморазведочных, гравиразведочных, электроразведочных и геохимических работ (рис.3), проведено большое количество разномасштабных геологических и поисковых работ, пробурена Воротиловская сверхглубокая скважина (7, 27).



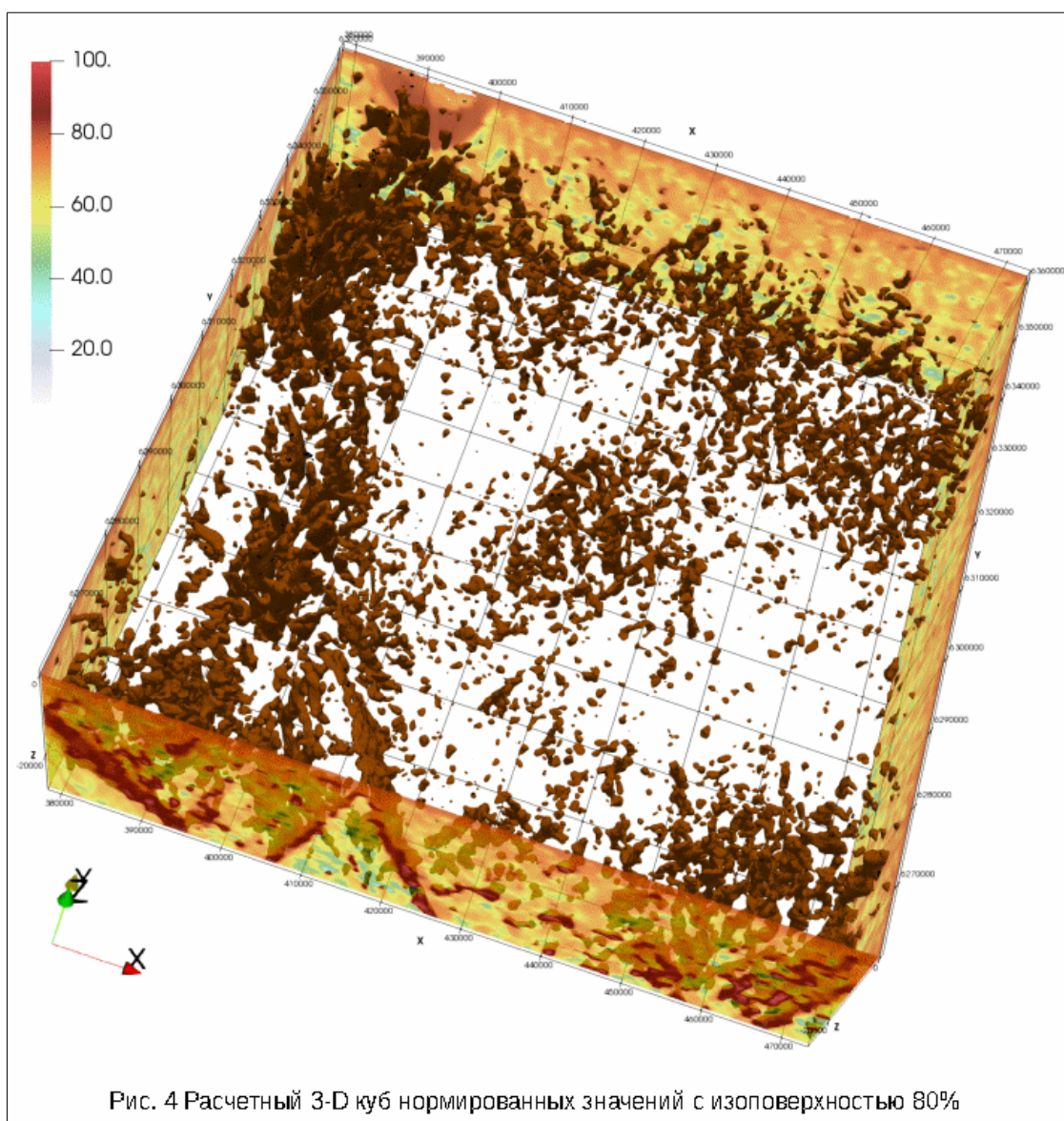
Анализ гравитационных и магнитных аномалий подтверждает линейный северо-восточный тренд этих полей, значительную их корреляцию с рельефом фундамента (рис.3) и восстановленным по результатам геолого-съёмочных работ масштаба 1:50 000 структурно-тектоническим каркасом территории (13).

Материалы исследований Воротиловской сверхглубокой скважины (5374м) (7, 27) 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) (27).

Большое количество новейших геолого-геофизических данных и использование новых технологий дистанционного зондирования позволило автору провести повторный анализ геологического строения Ковернинской впадины с

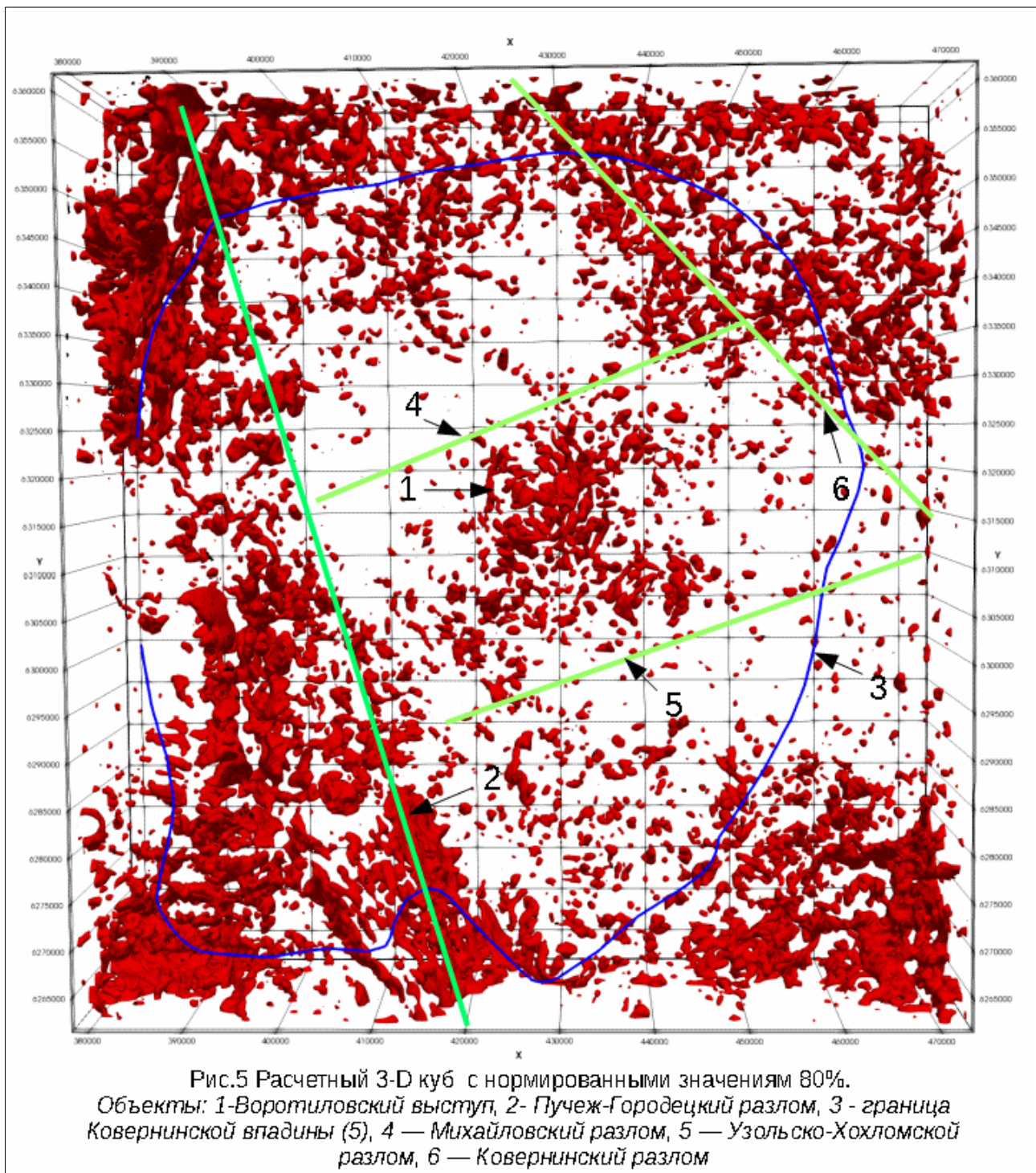
использованием оригинальной технологии реконструкции структурно-тектонического каркаса территорий на основе экспериментально установленного (12, 26, 31) факта что литосфера способна генерировать низкочастотные электромагнитные и сейсмамагнитные возмущения, создающие на границе разделов «Земля-атмосфера, вода-атмосфера» сложную структуру электромагнитных полей, несущих информацию о процессах в земной коре, ее строении и свойствах (15). В основе технологии лежат известные вычислительные схемы (40), адаптированные к 3-D построениям и современным вычислительным возможностям (34-36).

Для проведения анализа использовался спектрозональный снимок “Landsat-8” LC08\_L1TP\_175020\_20180522\_20180605\_01\_T1. Для анализа и визуализации данных использовалась программа ParaView 5.4.1-822 (приложение с открытым исходным кодом - <https://www.paraview.org>). Глубина расчета по ближнему инфракрасному каналу “Landsat-8” составляла 6 км (рис.4).





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.



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 (13).

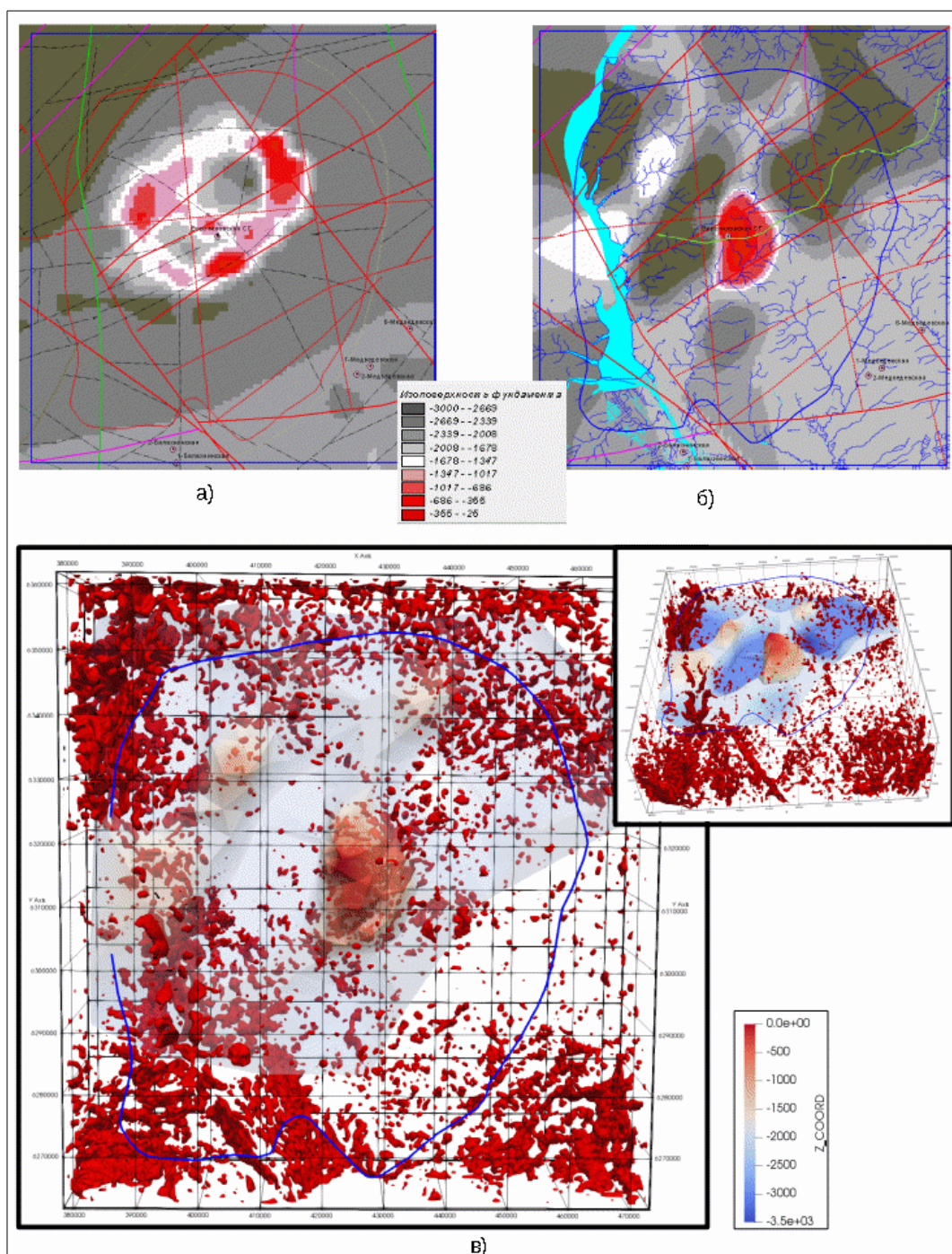


Рис.6 Поверхность фундамента по данным Госгеолкарты-200 (9) — а, по данным работ масштаба 1:50 000 (13) — б, расчетный 3-D куб по нормированному значению 80%, совмещенный с моделью поверхности фундамента из рис.2 (13) - в



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.

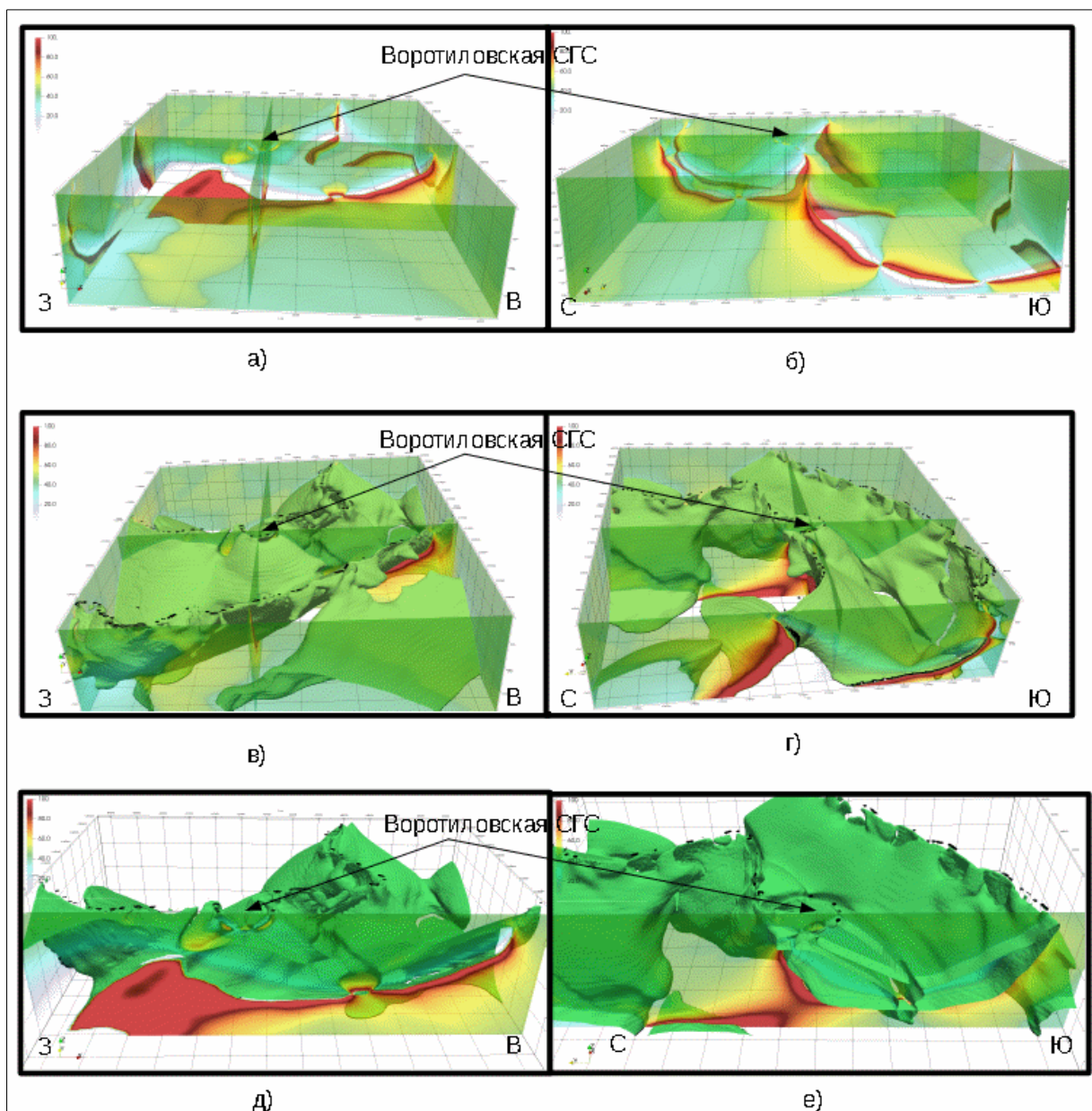


Рис.7 Расчетный 3-D куб нормированных гравиметрических данных до гл.20 км:  
а) широтный разрез, б) меридиональный разрез, в) широтный разрез с изоповерхностью 40%, г) меридиональный разрез с изоповерхностью 40%, д) широтный разрез с обрезанной изоповерхностью 40%, е) меридиональный разрез с обрезанной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

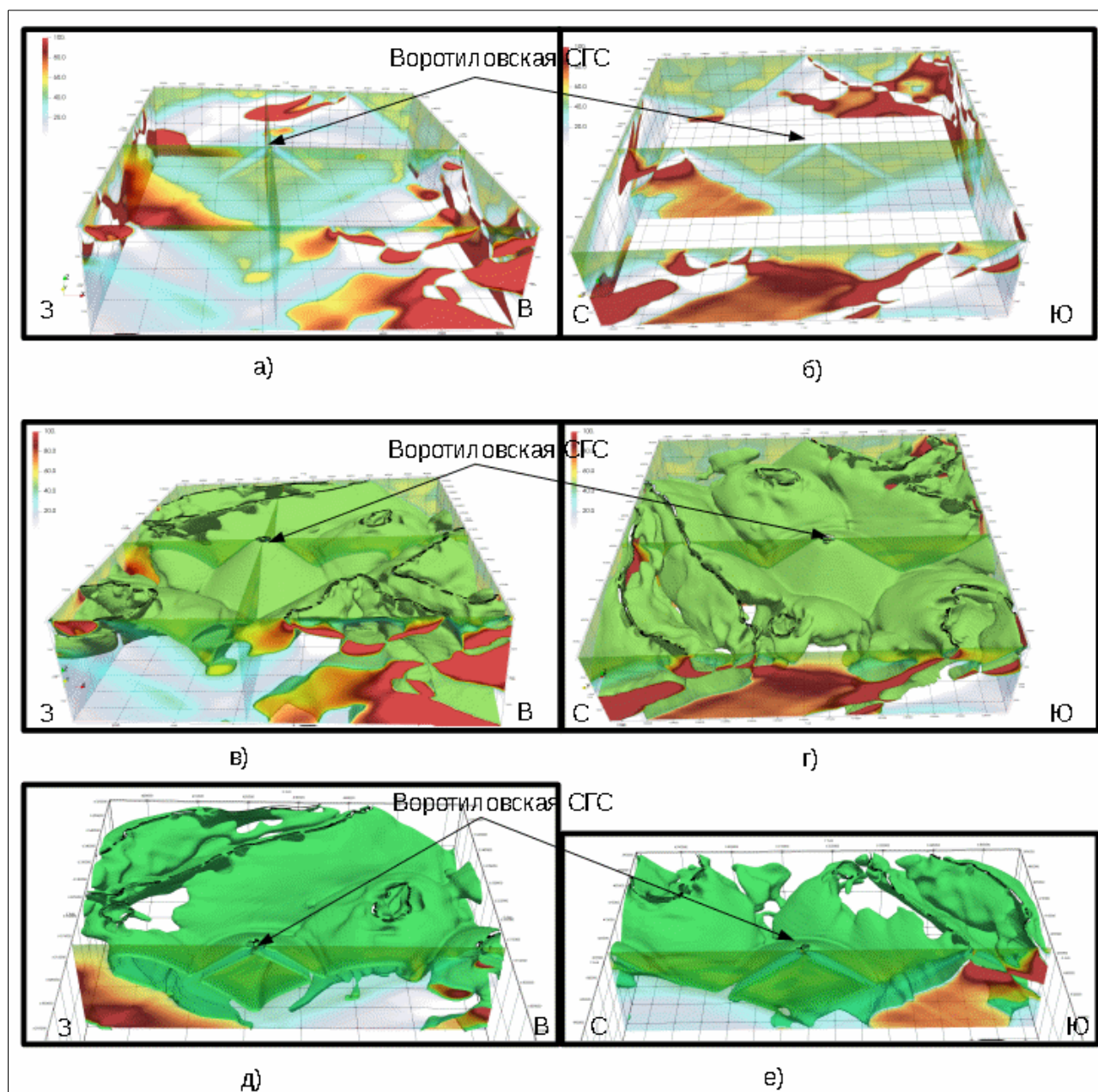
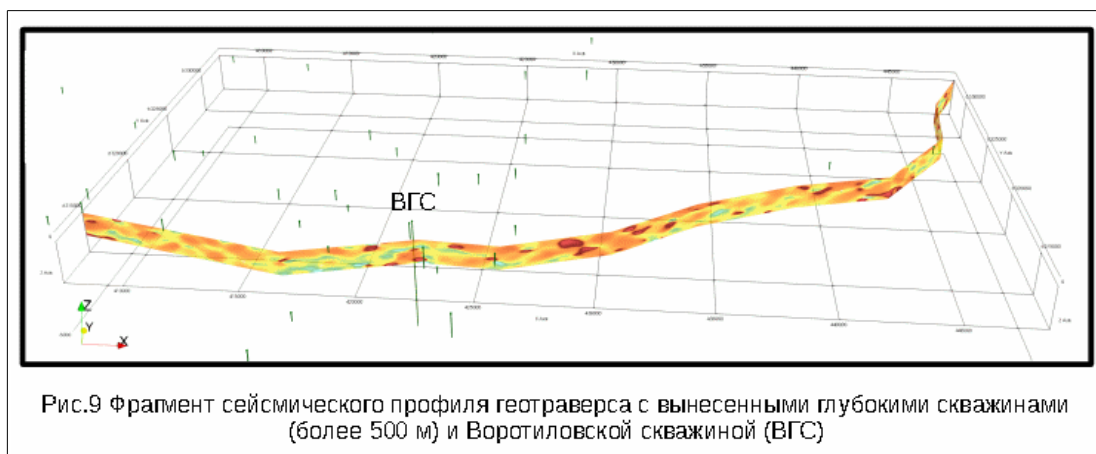
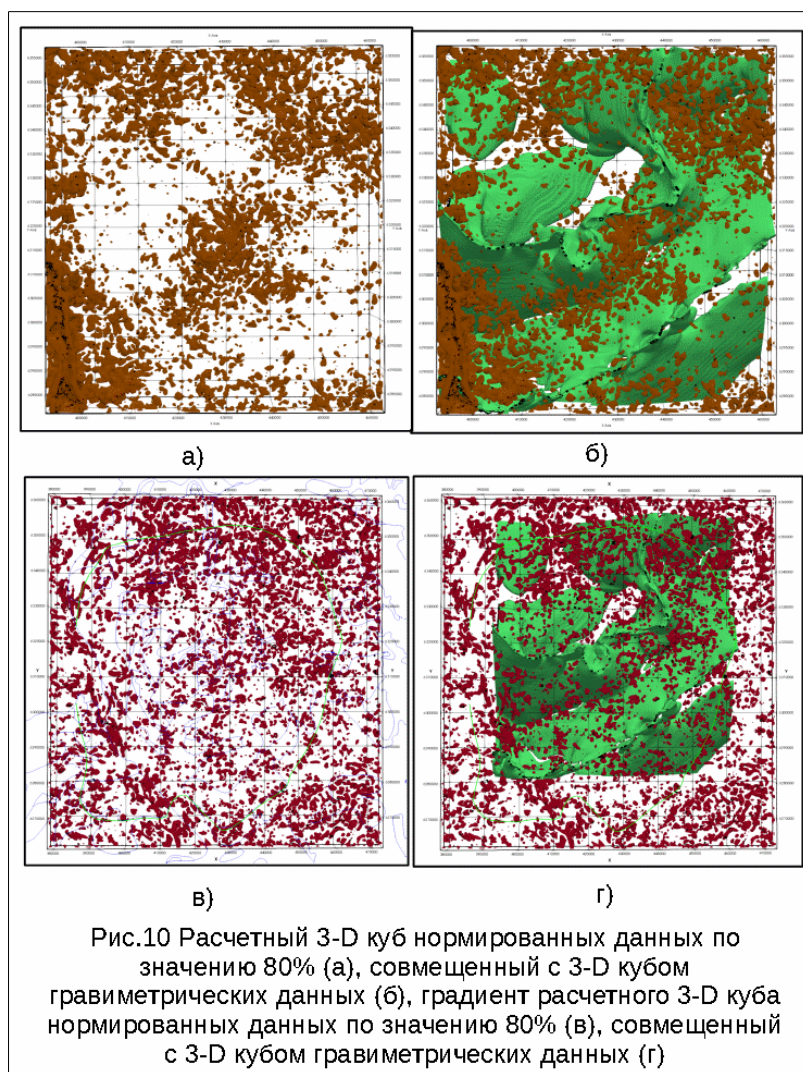


Рис.8 Расчетный 3-D куб нормированных магнитометрических данных до гл.20 км:  
а) широтный разрез, б) меридиональный разрез, в) широтный разрез с изоповерхностью 40%, г) меридиональный разрез с изоповерхностью 40%, д) широтный разрез с обрезанной изоповерхностью 40%, е) меридиональный разрез с обрезанной 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.6б, 10б, г). На региональном фоне Воротиловский выступ является локальным осложнением как и Белбазская впадина, образование которых контролировалось Ковернинским разломом (рис.2, 11) северо-западного простирания.





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).

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).

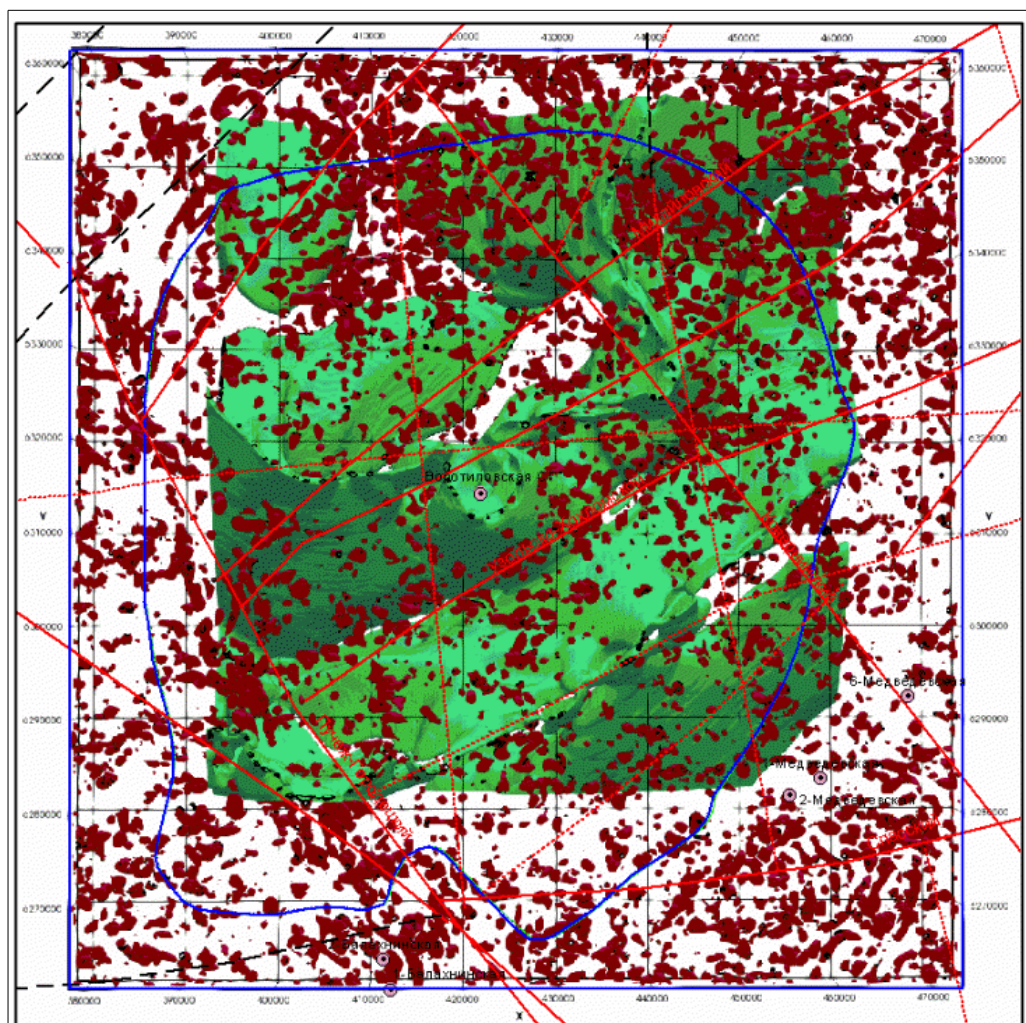
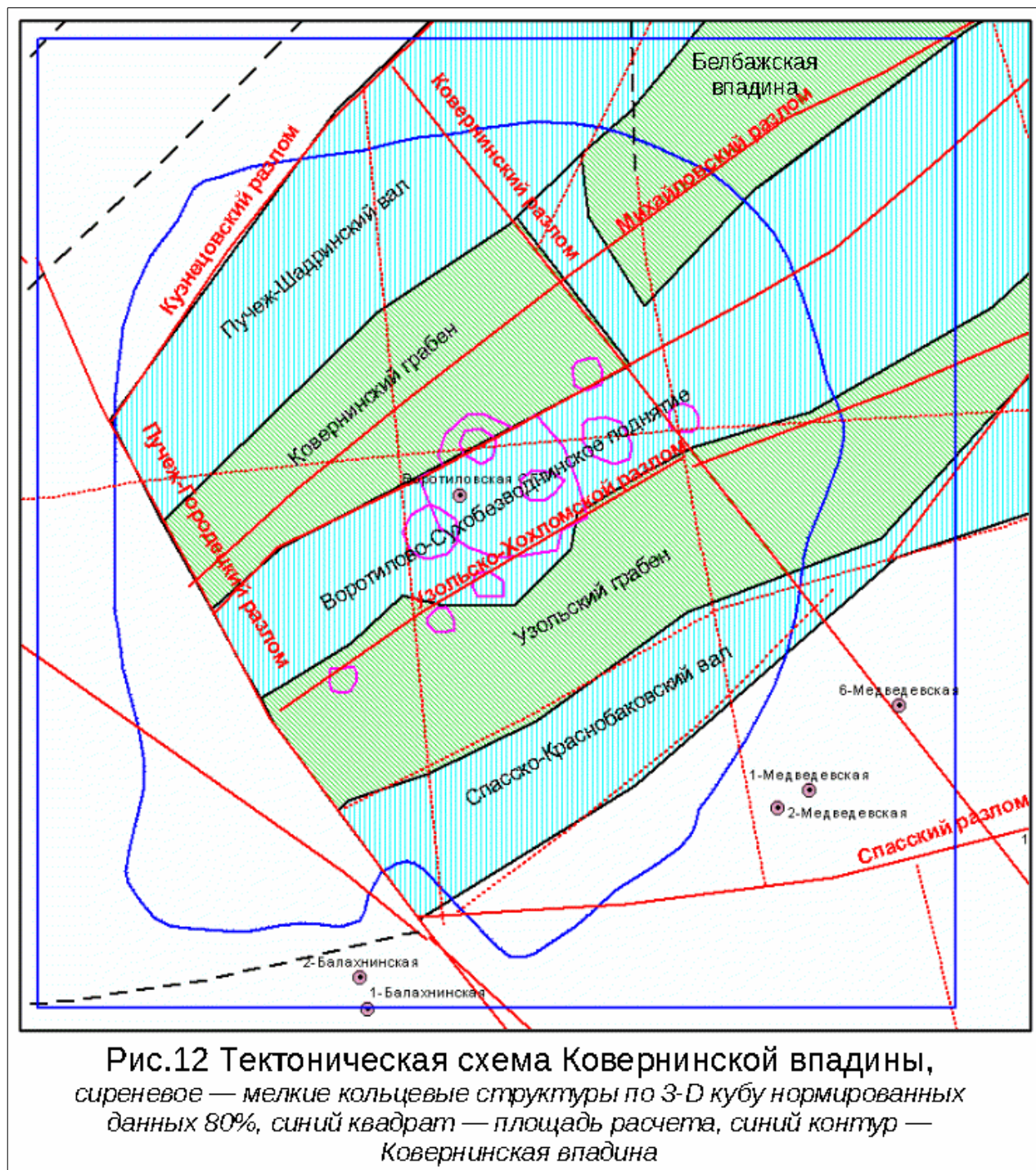


Рис.11 Схема совмещения расчетного 3-D куба градиента нормированных данных и гравиметрических данных с тектонической схемой Ковернинской впадины

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).



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 (16) 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 (16).

Данные по Воротиловской сверхглубокой скважине (7, 26) свидетельствуют только о взрывном характере происходившего процесса (13), 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 (7, 16, 26) 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.

### 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. 57-6.
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. Журнал «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. 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.
17. Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематические парагенезы в осадках фанерозойского чехла Среднерусской зоны дислокаций. Геотектоника. 2010. № 2. С. 56—76.
18. 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.



19. Колодяжный С.Ю. Структуры латерального течения северо-восточной части Восточно Европейской платформы. Статья 2. Структурные парагенезы осадочного чехла. Бюл. МОИП. Отд. геол. 20126. Т. 87, вып. 2. С. 3-16.
20. Копп М.Л. Вятские дислокации: динамика формирования и выражение в новейшей структуре (Восточно-Европейская платформа). Геотектоника. 2012. № 6. С. 55-77.
21. Лукьянов А. В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М.: Наука, 1965. 212 с.
22. Маракушев А.А., Богатырев О.С. Феногенов АЛ. и др. Формирование Пучеж-Катунской кольцевой структуры на Русской платформе. Докл. АН. 1993. Т. 328, № 3. С. 364—368.
23. Масайтис В.Л. Пучеж-Катунская астроблема. Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. С. 59-69.
24. Нечитайло С.К, Веселовская М.М., Скворцова Е.Н. Материалы по геологии Городецко-Ковернинской тектонической зоны. М.: Гостоптехиздат, 1959. 128 с.
25. 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
26. 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.
27. Песков Е.Г. Пояса взрывных структур («астроблем»). Геотектоника. 1992. № 5. С. 20—26.
28. Соловьёв В.К. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:1000000. Лист 0-38 (Горький). М.: Госгеолтехиздат, 1958. 112 с.
29. 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.
30. Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах. Геофизический журнал, 2007 г. № 2, с. 3—16
31. Фивенский Ю.И. Использование материалов аэрокосмических съемок для изучения земной коры. Журнал «Геодезия и картография» №1, 2006, с. 44-52
32. Фирсов Л. В. О метеоритном происхождении Пучеж-Катунского кратера. Геотектоника. 1965. № 2. С. 106—118.
33. Фивенский Ю.И. Малые кольцевые структуры рыхлых отложений земной коры. Научное открытие. Диплом ОТП РАН №02-д02 от 22 октября 2002 г.
34. Alexey Pechnikov, Robust Depth Estimation Using Circular Mean Radon Transform for the Inverse Potential Problem, 2018.  
[https://github.com/mobigroup/articles/blob/master/gravity/sphere\\_radon.pdf](https://github.com/mobigroup/articles/blob/master/gravity/sphere_radon.pdf)
35. Alexey Pechnikov, Выделение кольцевых структур в геопотенциальных полях с помощью высокочастотной фильтрации и получение численного решения обратной задачи, 2018.  
[https://github.com/mobigroup/articles/blob/master/gravity/circle\\_radon.pdf](https://github.com/mobigroup/articles/blob/master/gravity/circle_radon.pdf)
36. Alexey Pechnikov, Получение численного решения обратной задачи по высокочастотной составляющей геопотенциальных полей, 2018.  
[https://github.com/mobigroup/articles/blob/master/gravity/pairs\\_radon.pdf](https://github.com/mobigroup/articles/blob/master/gravity/pairs_radon.pdf)
37. Huber K., Fuchs K., Palmer J. et al. Analysis of borehole televiewer measurements in the \brotilov drillhole, Russia — first results. Tectonophysics. 1997. bl. 275, N 1-3. P. 261-272.

38. Marrett R.A., Allmendinger R. W. Kinematic analysis of fault- slip data//J. Structural Geol. 1990. \fol. 12. P. 973—986.
39. 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.
40. Saxov, S., & Nygaard, K. RESIDUAL ANOMALIES AND DEPTH ESTIMATION. GEOPHYSICS, 18(4), 913–928, (1953). doi:10.1190/1.1437945