

УДК 550

Ю. И. Блох¹, В. И. Бондаренко², А. С. Долгаль³,
П. Н. Новикова³, В. А. Рашидов⁴, А. А. Трусов⁵¹ Москва;² Костромской государственной университет им. Н. А. Некрасова,
г. Кострома;³ Горный институт УрО РАН, г. Пермь;⁴ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский e-mail: rashidva@kscnet.ru⁵ ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика», г. Москва

Строение подводного вулкана Макарова (Охотоморский склон Курильской островной дуги)

Приводятся результаты комплексного изучения строения подводного вулкана Макарова, расположенного на Охотоморском склоне Курильской островной дуги примерно в 25 км к юго-западу от о. Чиринкотан.

Местоположение объекта, морфология, состав и магнитные свойства драгированных пород

Впервые подводный вулкан Макарова (рис. 1) был обследован на нескольких галсах в экспедициях Института океанологии (ИО) АН СССР в 1949–1955 гг. на НИС «Витязь» и НИС «Крылатка» и получил своё название в честь крупнейшего русского океанографа, адмирала Степана Осиповича Макарова [5]. Вулкан расположен в пределах Курильской островной дуги (КОД) примерно в 25 км к юго-западу от о. Чиринкотан [5, 13]. Он включен в «Каталог подводных вулканов и гор Курильской островной дуги» под номером 3,7 [12].

В 1980 г. сотрудники СахКНИИ ДВО АН СССР в 21 рейсе НИС «Пегас» выполнили драгирование подводного вулкана Макарова [11].

В 1982 и 1985 гг. в 15-ом и 24-ом рейсах НИС «Вулканолог» сотрудниками Института вулканологии (ИВ) ДВО АН СССР в районе вулкана Макарова было отработано 5 геофизических профилей (рис. 2) и выполнена одна станция драгирования.

Подводный вулкан Макарова является существенно лавовым. При драгировании вулкана в 24-ом рейсе НИС «Вулканолог» (рис. 3) и 21-ом рейсе НИС «Пегас», были подняты базальты, андезибазальты, андезиты, андезидациты, дациты и небольшие гальки палеотипных пород [11, 12]. Многие небольшие драгированные образцы покрыты железомарганцевой коркой (рис. 4), содержание Mn в них составляет 12,595 вес. %, а Fe — 12,817 вес. % [1].

Изучение физических свойств драгированных образцов в лабораторных условиях показало, что наиболее магнитными среди них являются андезибазальты и галька диорита (см. таблицу).

Результаты геофизических исследований

Комплекс геофизических исследований включал в себя эхолотный промер глубоководным эхо-

лотом «WD-110M», непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) в одноканальном варианте в модификации метода центрального луча с применением электроискрового источника типа «спаркер» [4] и модульную гидромагнитную съёмку (ГМС) протонным магнитометром ПМИВ, разработанным в ИВ АН СССР. При проведении геофизических исследований использовалась единая служба судового времени, которая позволяла синхронизировать работу измерительной аппаратуры различных методов исследований и приводить ре-

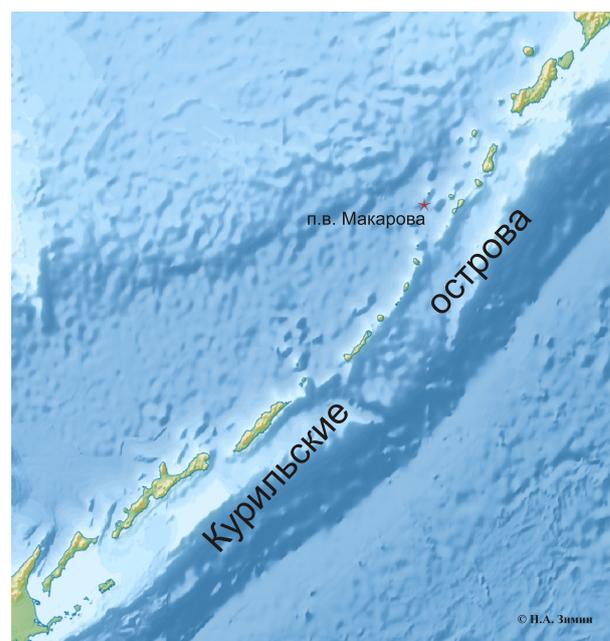


Рис. 1. Местоположение подводного вулкана Макарова.

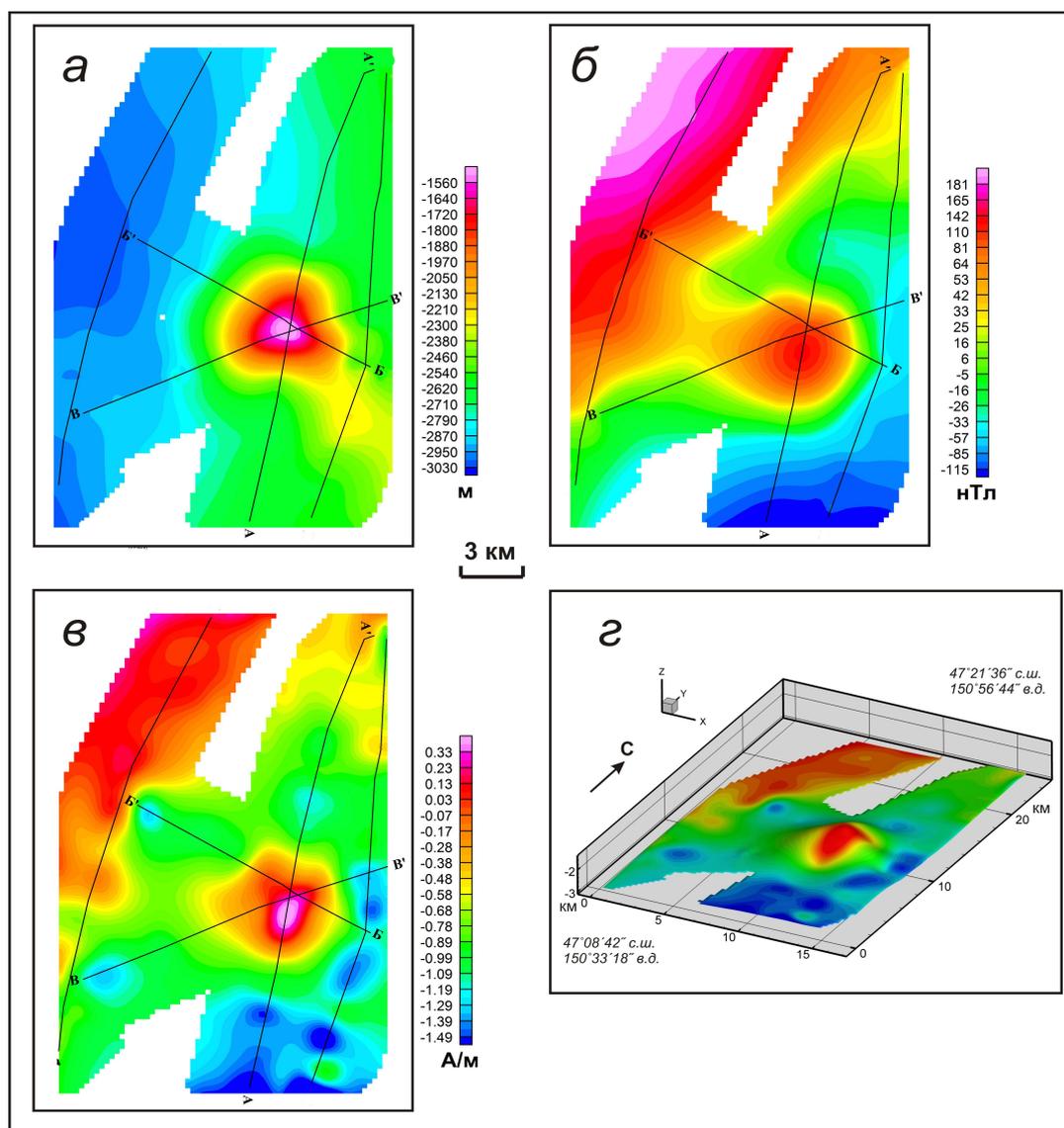


Рис. 2. Подводный вулкан Макарова: а – батиметрия; б – аномальное магнитное поле ΔT_{α} ; в – распределение эффективной намагниченности вулкана; г – распределение эффективной намагниченности, изображенное на поверхности вулкана.

Физические свойства пород, драгированных на подводном вулкане Макарова

№п/п	Количество образцов	Горная порода	Диапазон изменения остаточной намагниченности J_n , А/м	Диапазон изменения магнитной восприимчивости χ , 10^3 СИ
1	9	Андезитобазальт	3,04–6,29	3,2–12,5
2	9	Базальт	0,69–3,08	5,49–26,0
3	3	Диорит	0,10–0,16	5,26–5,66
4	3	Галька диорита	6,01–6,41	10,2–10,4

зультаты измерений к единым координатам времени и пространства.

В результате выполненных работ с борта НИС «Вулканолог» над вершиной вулкана Макарова отмечена минимальная глубина 1340 м [12] (рис. 2а),

а не 1437 м, как было измерено в экспедициях ИО АН СССР [5]. Вулканическая постройка возвышается над окружающим дном Охотского моря примерно на 2500 м, а крутизна склонов, лишенных осадков, достигает 30° . Размер основания, перекрытого осад-



Рис. 3. Образцы горных пород, драгированных в 24 рейсе НИС «Вулканолог» на подводном вулкане Макарова.



Рис. 4. Железомарганцевые образования, драгированные в 24 рейсе НИС «Вулканолог» на подводном вулкане Макарова.

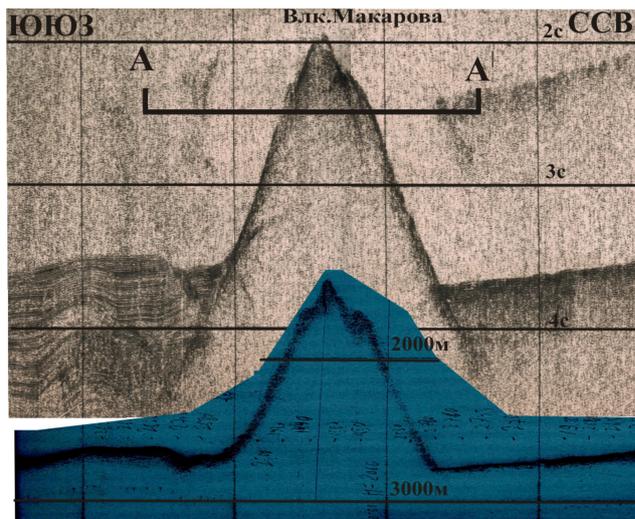
ками мощностью до 1000 м — 12×15 км (рис. 2а, 2г), а его объём — около 120 км³.

Интерпретация материалов комплексных геофизических исследований была выполнена с помощью технологии моделирования данных гидромагнитной съёмки в комплексе с эхолотным промером, непрерывным сейсмоакустическим профилированием и анализом естественной остаточной намагниченности и химического состава драгированных горных пород, разработанной авторами [6–8].

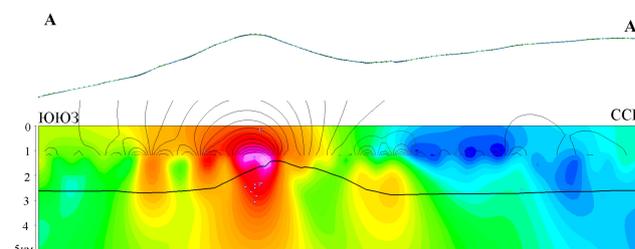
В результате применения этой технологии сделано предположение, что с юго-юго-запада к подводному вулкану Макарова примыкает погребённая куполообразная структура, а привершинная часть вулкана представляет собою экстррузивный купол, сформировавшийся в древнем кратере (рис. 5а).

Применение интегрированной системы СИНГУЛЯР [9] дало возможность установить, что основные особенности магнитного поля приурочены к верхней кромке намагниченных объектов, и позволило предположить наличие на глубинах 2,5–3,0 км периферического магматического очага, а так же субвертикальное положение подводящей системы (рис. 5б).

Применение программы ИГЛА [7, 10] (рис. 6) свидетельствует о том, что вектор суммарной намагниченности из-за высокой остаточной намагниченности пород вулкана Макарова отклонен от вектора нормального поля T_0 в данном районе к югу на угол около 38° (склонение 211°, наклонение 77°).



а



б

Рис. 5. Совмещенный профиль А-А' НСП и эхолотного промера (а) и изображение, синтезированное системой СИНГУЛЯР для локализации особых точек функций, описывающих аномальное магнитное поле ΔT_a подводного вулкана Макарова, с наложенным рельефом дна по данным эхолотного промера (б). Местоположение профиля см. на рис. 2.

Проведённое 3D-моделирование с помощью программы REIST из пакета СИГМА-3D [2] показало, что наиболее интенсивно намагниченной является привершинная часть вулканической постройки и фрагмент её южного склона до глубины 2300 м (рис. 2в, 2г). Среднеквадратическая погрешность подбора аномального поля ΔT_a при этом составила $\pm 8,1$ нТл, что сопоставимо с точностью съёмки.

Интересной особенностью результатов выполненной интерпретации является выявленное кольцо изометричных минимумов намагниченности, охватывающее основание вулкана (рис. 2в, 2г) и приуроченных к небольшим локальным положительным структурам, проявляющимся на профилях НСП и эхолотного промера, которые, вполне вероятно, являются побочными конусами. Подобная картина при комплексном изучении других подводных вулканов КОД никогда ранее не встречалась. Выявление этих структур в основании вулкана Макарова стало возможным только благодаря разработанной

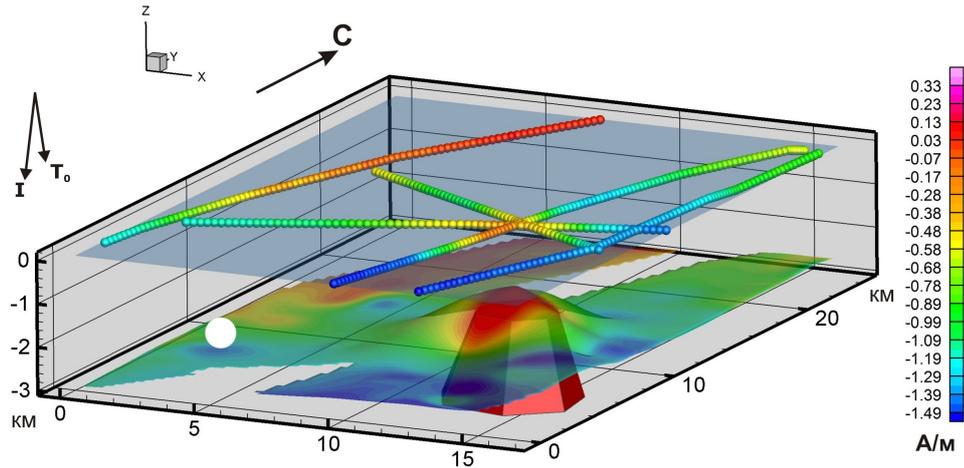


Рис. 6. Уточнение ориентировки вектора намагниченности пород подводного вулкана Макарова с помощью программы ИГЛА.

современной технологии комплексного моделирования подводных вулканов.

Результаты томографической интерпретации аномального магнитного поля ΔT_a хорошо согласуются с данными 3D-моделирования и подтверждают предположение о том, что наиболее намагниченной является вершина вулканической постройки, а с глубиной отмечается монотонное убывание намагниченности горных пород (рис. 7).

Результаты интерпретационной томографии позволили сформировать начальное приближение для решения нелинейной обратной задачи магнитометрии (ОЗМ) монтажным методом, использующим в качестве исходных данных вертикальную составляющую магнитного поля ΔZ_a , полученную путём редуцирования поля к полюсу.

При решении ОЗМ был выполнен подбор конфигурации аномалиеобразующего тела в вертикальной плоскости в 2.5D-варианте, представляющей собой набор правильных замкнутых многоугольни-

ков (элементов замощения) с плотным прилеганием по целой стороне [3]. Подбор проводился способом регулируемой направленной кристаллизации с квадратными элементами замощения размером 250×250 м. В результате была получена серия эквивалентных решений ОЗМ, отвечающих «коридору» невязки $[-15, 15]$ нТл. В качестве наиболее достоверного варианта интерпретации были выбраны модели с величиной намагниченности, равной 2,5 А/м, близкой к магнитным свойствам базальтов и андезибазальтов (рис. 8, таблица).

Решение нелинейной ОЗМ монтажным методом позволило выделить и оконтурить намагниченный объект, прослеженный на глубину до 11,5 км и имеющий средний размер в поперечнике ~ 2 км (рис. 9). Этот объект условно можно разделить на две части: привершинный трапециевидный блок, расположенный на глубинах 2,5–4,2 км, и субвертикальный крутопадающий блок с относительной высотой 7,5 км. Вершина первого блока имеет размер ~ 2 км, а основание — 2,2–2,8 км. Верхняя часть второго блока имеет размер $\sim 3,7$ км, а в нижняя — 2,8 км. Возможно, что этот крутопадающий блок является подводящей системой вулкана, а трапециевидный блок представляет собой застывший периферический магматический очаг.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что подводный вулкан Макарова является существенно лавовым. Над его вершиной отмечена минимальная глубина 1340 м, а его постройка возвышается над дном Охотского моря \sim на 2500 м. Крутизна склонов, лишенных осадков, достигает 30° . Основание, перекрытое осадками мощностью до 1000 м, имеет размер 12×15 км, а объём — около 120 км^3 .

Возможно, что привершинная часть вулкана представляет собою экструзивный купол, сформировавшийся в древнем кратере. С юго-юго-запада к под-

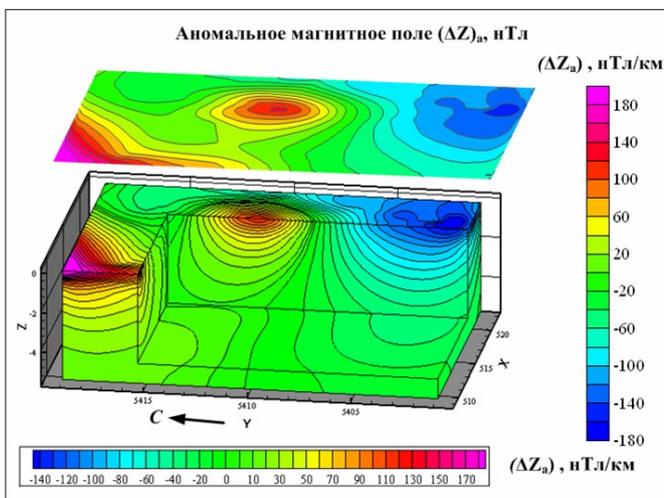


Рис. 7. Томографическая интерпретация магнитного поля вулкана Макарова.

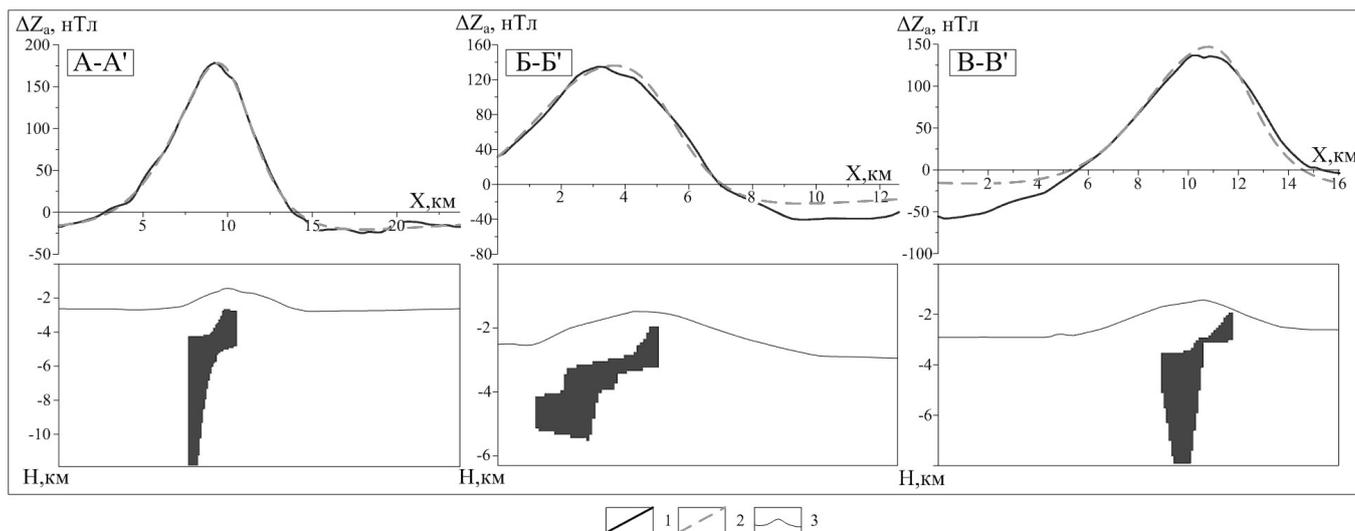


Рис. 8. Результаты решения обратной задачи магниторазведки монтажным методом для профилей А-А', Б-Б' и В-В': 1 — исходное поле; 2 — модельное поле; 3 — рельеф дна по данным эхолотных промеров. Местоположение профилей см. на рис. 2.

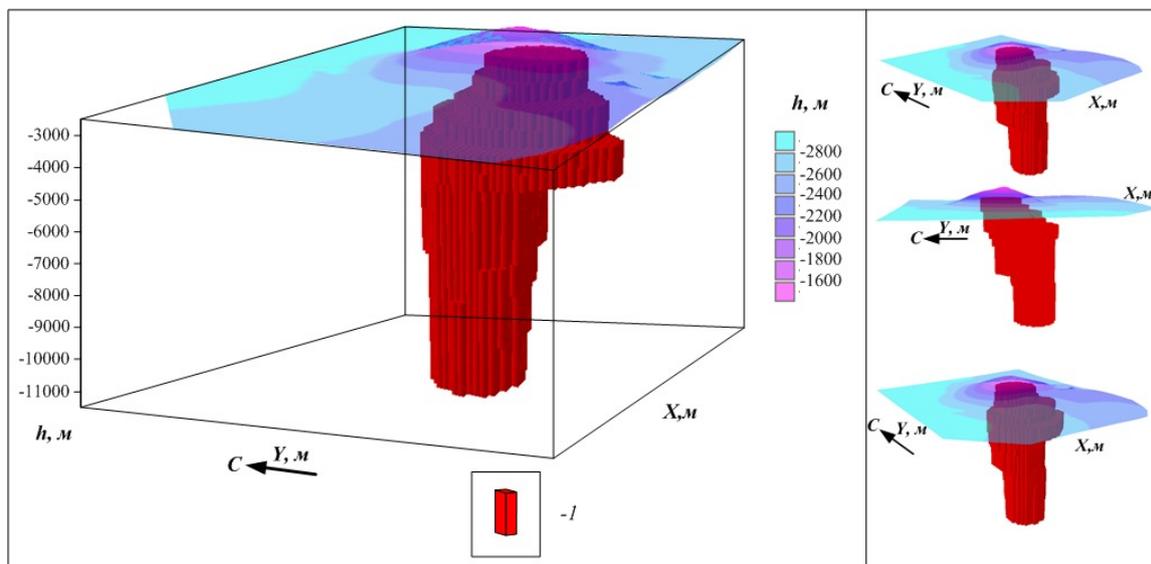


Рис. 9. Интерполяционная 3D-модель источника магнитного поля.

водному вулкану Макарова примыкает погребённая куполообразная структура.

Выполнена оценка магнитных свойств вулканических горных пород: как в естественном залегании, так и в лабораторных условиях.

Выявлен магнитовозмущающий блок, прослеженный на глубину до 11,5 км.

Сделаны предположения о наличии на глубинах 2,5–4,2 км застывшего периферического магматического очага и субвертикальном положении подводящей системы вулкана.

Авторский коллектив, состоящий из представителей классических отечественных геофизических школ, на примере вулкана Макарова продолжил плодотворную интеграцию вузовской, академической и отраслевой науки организаций Москвы, Костромы,

Перми и Петропавловска-Камчатского для изучения подводных вулканов КОД, а также привлечение молодых учёных и аспирантов для выполнения фундаментальных научных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-05-00 156-а и 12-05-00 414-а).

Список литературы

1. Аникеева Л.И., Казакова В.Е., Гавериленко Г.М., Рашидов В.А. Железомарганцевые корковые образования западно-тихоокеанской переходной зоны // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 10–31.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпре-

- тации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 31 сессии Междунар. семинара им. Успенского Д. Г. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 88–89.
3. Балк П. И., Долгаль А. С., Балк Т. В. Сеточные методы решения обратных задач и опыт их применения при прослеживании дифференцированных интрузий по данным гравиразведки // Геология и геофизика. 1993. № 5. С. 127–134.
 4. Баснак В. В., Дубровский В. Н., Селивёрстов Н. И. Аппаратурный комплекс НСП на НИС «Вулканолог» // Вулканология и сейсмология. 1981. № 1. С. 93–103.
 5. Безруков П. Л., Зенкевич Н. Л., Канаев В. Ф., Удинцев Г. Б. Подводные горы и вулканы Курильской островной гряды // Тр. Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 71–88.
 6. Блох Ю. И., Бондаренко В. И., Долгаль А. С., Новикова П. Н., Рашидов В. А., Трусов А. А. Геофизические исследования подводного вулкана 6.1 (Курильская островная дуга) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 38-й сессии Международного научного семинара имени Успенского Д. Г., Пермь, 24–28 января 2011 г. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 32–35.
 7. Блох Ю. И., Бондаренко В. И., Долгаль А. С., Новикова П. Н., Рашидов В. А., Трусов А. А. Современные интерпретационные технологии при комплексных геофизических исследованиях подводного вулкана Макарова (Курильская островная дуга) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Успенского Д. Г. Воронеж: ВГУ, 2012. С. 36–40.
 8. Блох Ю. И., Бондаренко В. И., Долгаль А. С., Новикова П. Н., Рашидов В. А., Трусов А. А. Комплексные геофизические исследования подводного вулкана 6.1 (Курильская островная дуга) // Геофизика. 2012. № 2. С. 58–66.
 9. Блох Ю. И., Каплун Д. В., Коняев О. Н. Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе «СИНГУЛЯР» // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123–127.
 10. Блох Ю. И., Трусов А. А. Программа «IGLA» для интерактивной экспресс-интерпретации локальных гравитационных и магнитных аномалий // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 34-й сессии международного семинара им. Успенского Д. Г. М.: ИФЗ РАН, 2007. — С. 36–38.
 11. Корнев О. С., Неверов Ю. Л., Остапенко В. Ф. и др. Результаты геологического драгирования в Охотском море на НИС «Пегас» (21-й рейс) // Геологическое строение Охотоморского региона. Владивосток: СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 36–51.
 12. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Пушаровский Ю. М. М.: Наука, 1992. 528 с.
 13. Gnibidenko G. S., Svarichevsky A. S. Tectonics of the South Okhotsk Deep-Sea Basin // Tectonophysics. 1984. Vol. 102. P. 225–244.